

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Ю. Л. АВЕТИКЯН

О ВЛИЯНИИ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ИЗУЧЕНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Началом лабораторных исследований водопроницаемости грунтов считают опыты Дарси, опубликованные в 1856 году. На основании этих опытов была установлена линейная зависимость между скоростью фильтрации (v) и градиентом (i). Эта закономерность лежит в основе современной теории фильтрации и называется „законом Дарси“, который выражается формулой $v = k \cdot i$, где k — коэффициент фильтрации. В дальнейшем, различными авторами был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований, связанных с движением грунтовых вод. Однако, несмотря на это, некоторые вопросы относящиеся к фильтрации воды в пористой среде все еще остаются спорными. Довольно противоречивы, в частности, имеющиеся в литературе данные относительно влияния направления фильтрации воды на результаты лабораторного опыта.

Например, имеются данные [1], когда „закон Дарси“ экспериментально подтверждался только при горизонтальном направлении фильтрационного потока, а при вертикальной фильтрации линейная связь между скоростью фильтрации и градиентом нарушалась.

Другие авторы [2], [3] изучавшие фильтрацию воды через грунтовые образцы, установленные сначала вертикально, а потом горизонтально, пришли к выводу, что в первом случае не только „закон Дарси“ не подтверждается, но и скорость фильтрации заметно меньше, чем таковая при горизонтальной фильтрации, хотя в опытах напор на установке оставался постоянным.

Ряд авторов (Терцаги К., Избаш С. В., Зауэрбрей И. И., Морозов А. Т. и др.) в своих опытах по фильтрации пропускали воду в вертикальном направлении и получили данные, подтверждающие справедливость закона Дарси для вертикального случая фильтрации. В литературе [4] имеются ссылки и на то обстоятельство, что в лабораторных условиях вообще нельзя получить удовлетворительную линейную связь между скоростью фильтрации и градиентом, и что в лучшем случае можно получить лишь волнообразную линию, отклоняющуюся от прямой то в одну, то в другую сторону.

Известно, что результаты лабораторного опыта по фильтрации в

значительной мере зависят от степени влияния на фильтрацию различных побочных факторов, которые искажают процесс фильтрации в целом. Особенно сильно влияет на результаты опыта степень газонасыщенности грунта и воды [6]. Поэтому, для правильного решения того или иного вопроса, связанного с движением грунтовой воды в пористой среде, необходимо, прежде всего, эксперименты проводить в таких условиях, когда влияние побочных факторов, и в первую очередь газонасыщенности грунта и воды, было бы по возможности исключено.

Однако, подробный анализ имеющихся в литературе соответствующих данных и результаты наших предварительных опытов по фильтрации воды через различные пески показывают, что противоречивые отклонения от закона Дарси, полученные различными исследователями имели место исключительно вследствие несовершенства методики экспериментирования, когда в опытах авторы вовсе не учитывали влияние на фильтрацию тех или иных побочных факторов, либо учитывали их не полностью.

Для уточнения влияния направления фильтрации на результаты

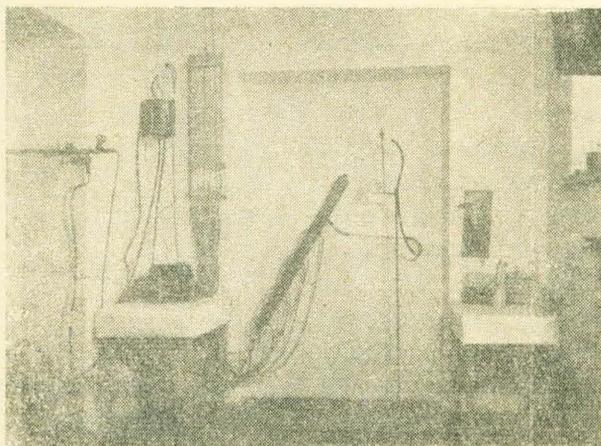


Рис. 1.

опыта, на специальной фильтрационной установке (общий вид рис. 1), состоящей из собственно фильтрационного прибора и дегазационной установки, нами была проведена большая серия опытов по фильтрации воды через различные пески. Были исследованы (таблица 1):

а) однородные грунты (№№ 1, 2, 3 и 4),

б) слоистый грунт (№ 5) составленный из 3-х однородных грунтов №№ 1, 2 и 3, расположенных слоями (высота каждого слоя 290 мм) и

в) неоднородный грунт (№ 6).

Фильтрационная установка позволяла пропускать воду в различных направлениях: вертикально ($\alpha = 90^\circ$) снизу вверх и сверху вниз

Таблица 1

№ грунтов	Диаметры зерен в мм					Кoeffи- циент пори- стости ε
	Весовое содержание фракций в %/%					
	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,10	0,10—0,05	
1	89,90	10,75	0,25	—	—	0,462
2	—	85,73	7,77	6,50	—	0,484
3	—	—	87,65	12,35	—	0,499
4	—	—	—	95,00	5,00	0,511
5	—	—	—	—	—	0,479
6	26,04	25,64	36,28	10,54	1,50	0,421

(в последнем случае фильтрационная трубка поворачивалась на 180°), под различными углами к горизонту ($\alpha = 60^\circ; 45^\circ; 30^\circ$) и горизонтально ($\alpha = 0^\circ$). Для этого трубка (рис. 2), укрепленная болтами к стене, поворачивалась относительно нижней неподвижной точки (для фильтрации снизу вверх — вокруг точки А, для фильтрации сверху вниз — вокруг точки В).

Так как при повороте трубки на соответствующий угол α фильтрация не прерывалась (длина водопроводящих и других шлангов была подобрана так, чтобы при повороте трубки они не отключались и не переключались), то была исключена какая-либо возможность случайного попадания воздуха в прибор.

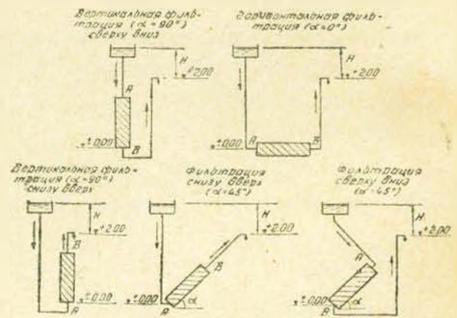


Рис. 2.

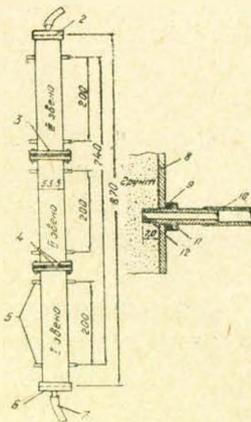


Рис. 3.

Фильтрационный прибор (рис. 3) состоял из 3-х звеньев оцинкованных железных труб с внутренним диаметром 53,5 мм и общей длиной 870 мм. На обеих стенках трубки имелись симметрично расположенные съемные пьезометрические отростки (всего 12 шт.), соединенные резиновыми шлангами со стеклянными пьезометрами $d = 10$ мм. Давления в грунте замерялись на расстоянии 7 мм от внутренней стенки трубки. Для исключения пристенной фильтрации трубка с внутренней стороны „оклеивалась“ зернами песка с помощью специального лака. Укладка грунта производилась в предварительно налитую в прибор воду, с одновременным вибрированием его стенок вибратором. При этом, как показало изучение

вопроса, грунтовая загрузка получалась по высоте прибора равномерной, компактной, а количество заземленного в его порах воздуха — минимальным.

Принимались следующие градиенты фильтрации: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0. Выбор величины градиента в пределах до $i = 1,0$ обусловлен тем, что ни в естественных условиях, ни в условиях фильтрации под сооружениями пьезометрические уклоны, как правило, не превышают единицы; кроме того, при градиентах больше единицы, как показал профессор Герсеванов Н. М., независимо от принятых мер предосторожности, все же в процессе фильтрации будет иметь место газовыделение из воды. Во всех случаях, независимо от направления фильтрации, отметки воды нижнего бьефа оставались постоянной и градиенты менялись с помощью изменения горизонта воды верхнего бьефа (рис. 2). Скорость фильтрации определялась из отношения $v = \frac{Q}{\omega}$, где Q — фильтрационный расход, а ω — поперечное сечение

фильтрационной трубки равное $21,86 \text{ см}^2$. Так как опыты были проведены при различной температуре фильтруемой воды, то полученные при этом значения скоростей фильтрации пересчитывались на одну температуру, а именно $t = 10^\circ\text{C}$. Пересчет производился с учетом температурной поправки $\text{ТП} = 1 + 0,03368t + 0,0021t^2$, где t — температура фильтруемой воды.

Для грунтов № 1 и 2 фильтруемый расход определялся с помощью мерных колб объемом $W = 100 \text{ см}^3$; 250 см^3 и 500 см^3 , а для грунтов №№ 3, 4, 5 и 6 — объемно-весовым способом. Продолжительность фильтрации t_1 определялась с помощью секундомера. Градиенты фильтрации вычислялись по формуле $i = \frac{\Delta h}{l}$, где Δh — разность показаний концевых пьезометров, отстоящих друг от друга на расстоянии $l = 740 \text{ мм}$ (рис. 3). Промежуточные пьезометры служили для контроля; в частности, по ним контролировалась равномерность загрузки по высоте прибора.

В опытах применялась водопроводная вода содержащая, как это обычно бывает, определенное количество различных газов. Для исключения влияния на режим фильтрации газонасыщенности воды и грунта и получения стационарного режима фильтрации была разработана специальная методика исследования [6], которая в процессе фильтрации обеспечивала:

- 1) условия, при которых совершенно исключалось какое бы то ни было газовыделение из воды,
- 2) сравнительно быстрое удаление из грунтовых пор «заземленного» воздуха.

При этом уже полная деаэрация грунтовых пор наблюдалась через несколько часов (в зависимости от грунта и количества заземленного в его порах воздуха) после начала опыта, вследствие чего

устанавливался стационарный режим фильтрации для всего периода исследования. Это исключительно важно, ибо известно, что многие исследователи фильтрации с этой же целью пропускали воду через грунт непрерывно, в течение нескольких дней или недель, и даже после этого им в подавляющем большинстве случаев не удавалось получить устойчивую во времени фильтрацию, хотя напор на установке, температура воды и др. оставались при этом без изменения. При производстве опытов были предусмотрены и другие меры предосторожности, вследствие чего была полностью исключена возможность получения каких-либо случайных ошибочных данных, которые могли бы в той или иной степени повлиять на окончательные результаты исследования.

Объем настоящей статьи не позволяет здесь привести опытные данные, полученные для всех исследованных грунтов. В связи с этим, а также учитывая, что во всех случаях, независимо от грунта и времени проведения опытов были получены однообразные и повторяющиеся закономерности фильтрации, ниже в таблице 2 приводятся опытные данные только для грунта № 1. На основании этих, а также ана-

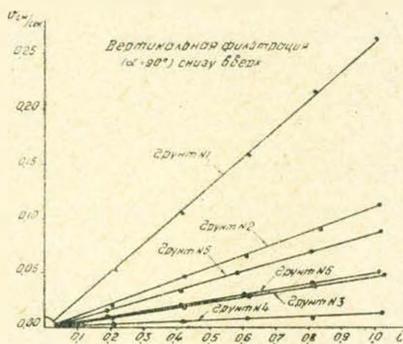


Рис. 4.

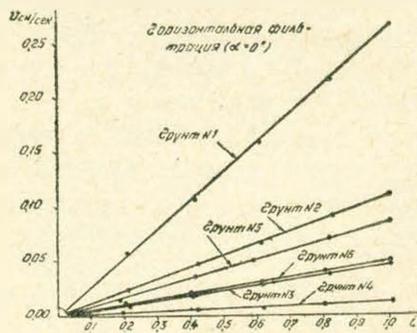


Рис. 5.

логичных данных, полученных для грунтов №№ 2, 3, 4, 5 и 6, построены графики (рис. 4—5) $v = v(i)$ для случаев вертикальной (снизу вверх) и горизонтальной фильтрации воды.

Зависимости $v = v(i)$ показывают, что в пределах исследованных градиентов ($i = 0,2—1,0$), независимо от направления движения воды связь между скоростью фильтрации и градиентом остается линейной. Такая же закономерность получена и для других исследованных направлений фильтрации, когда $\alpha = 60^\circ$; 45° и 30° . Сравнение опытных данных полученных для различных направлений фильтрации показывает так же, что для данного грунта при одном и том же градиенте, независимо от того как движется вода, скорость фильтрации остается постоянной.

Таким образом, результаты нашего исследования полностью подтверждают справедливость закона Дарси не только для вертикальной или горизонтальной фильтрации, но и для движения фильтрационного

Таблица 2

Δh (мм)	i	W (см ³)	t_1 (сек)	Q (см ³ /сек)	v (см/сек)	t С	ТП	v_{10} (см/сек)	Примечания
155,5	0,210	250	185,6	1,347	0,062	15,0	0,872	0,054	Вертикальная ($\alpha = 90^\circ$) фильтрация снизу вверх
302,0	0,408	250	92,7	2,697	0,123	15,6	0,859	0,106	
450,5	0,609	250	62,3	4,013	0,184	15,3	0,865	0,159	
603,0	0,815	500	92,2	5,423	0,248	15,0	0,872	0,216	
730,0	0,987	500	74,0	6,757	0,309	15,7	0,857	0,265	
154,0	0,209	250	191,6	1,305	0,060	14,0	0,895	0,054	Вертикальная ($\alpha = 90^\circ$) фильтрация сверху вниз
301,0	0,407	250	96,1	2,601	0,119	14,2	0,890	0,106	
447,5	0,605	500	129,0	3,876	0,177	14,0	0,895	0,158	
600,0	0,811	500	95,0	5,263	0,241	14,0	0,895	0,216	
730,0	0,987	500	77,2	6,477	0,296	14,0	0,895	0,265	
156,0	0,211	250	185,3	1,349	0,061	15,1	0,869	0,053	Горизонтальная фильтрация ($\alpha = 0^\circ$)
302,0	0,408	250	92,7	2,670	0,123	15,0	0,872	0,107	
450,0	0,608	250	62,4	4,013	0,184	15,3	0,865	0,159	
603,0	0,815	500	92,2	5,423	0,248	15,0	0,872	0,216	
729,5	0,986	500	73,7	6,784	0,310	15,9	0,852	0,264	

Примечание к таблице 2: Скорости воды для случая горизонтальной фильтрации подсчитаны по данным, полученным в серии опытов при движении воды по направлению снизу, вверх но при горизонтальном ($\alpha = 0^\circ$) положении фильтрационной трубки.

потока под различными углами к горизонту. Важно также, что наши выводы основанные на экспериментальных данных хорошо согласуются с теоретическими данными академика Павловского Н. Н. [5], который рассматривая вопрос теоретического объяснения основного закона фильтрации — закона Дарси указывает на то обстоятельство, что этот закон справедлив для установившегося движения воды независимо от того, под каким углом к горизонту направлена фильтрационная струйка воды.

В ы в о д ы

1. Приведенные в литературе данные относительно якобы имеющего место отклонения от закона Дарси при различных (кроме горизонтального) направлениях фильтрационного тока довольно противоречивы, не отражают естественные закономерности фильтрации и являются следствием существенного влияния на результаты опыта различных побочных факторов, искажающих фильтрацию.

2. Опыты по фильтрации воды через различные пески проведенные в условиях, когда было исключено какое-либо влияние побочных факторов на результаты опыта, вполне отчетливо подтвердили независимость закона Дарси от направления фильтрации для всех исследованных грунтов. Подтвердилось также, что определяемая величина скорости фильтрации, при прочих равных условиях (порозность, градиент и т. д.), не является функцией направления фильтрации.

Ереванский политехнический институт
имени К. Маркса

Поступило 22.III 1960

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Васильев А. М.* „Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов“. Москва, 1953.
2. *Николаев А. В.* „Проверка закона Дарси на монолитных образцах“. Северный научно-исследовательский институт Гидротехники и мелиорации. Выпуск II, Гидротехнический сборник, Ленинград, 1937.
3. *Андрущенко А. Г.* „Сравнительное рассмотрение способов определения коэффициентов фильтрации на приборах типов Дарси и Форхгеймера“. Сборник трудов Украинского отделения института ВОДГЕО, Харьков, 1940.
4. *Пузыревская Т. Н.* „Просачивание воды через песчаные грунты“. Известия НИИГ, т. 1, 1931.
5. *Павловский Н. Н.* „Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения“. Научно-мелиорационный институт, Петроград, 1922.
6. *Аветикян Ю. Л.* „О методике дезаэрирования пор газонасыщенных песков при лабораторном изучении их фильтрационных свойств“. Известия АН Армянской ССР (серия технических наук), том XI, № 5, 1958.