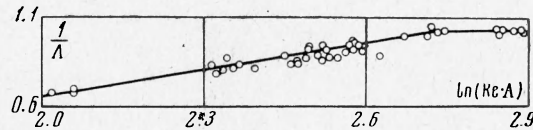


при данном градиенте давления

$$\varphi = \varphi_2 \zeta, \quad \langle w \rangle = \langle v \rangle \zeta, \quad \text{Re} = \text{Re}_H \zeta$$

Воспользуемся последним соотношением для получения зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \text{Re}_H \zeta = 1/2 \rho R^2 \varphi_2 \zeta \tau_c = a \zeta \tau_c$$



Фиг. 7

Подставляя это выражение в формулу логарифмической зависимости (3.3), получаем соответствующий логарифмический закон сопротивления (при  $\tau_c' \approx 0$ )

$$1 / \Lambda = A \ln \text{Re} \Lambda + B \quad (3.4)$$

где

$$A = 4/5 \vartheta \tau_c'', \quad B = 1 - A \ln a \tau_c''$$

На фиг. 7 производится сопоставление результатов опытов по движению крови в круглых цилиндрических каналах с уравнением (3.4). Излом прямой соответствует установлению режима течения жидкости с постоянной текучестью.

Автор благодарит К. Д. Воскресенского и Э. Э. Кенига за руководство и помощь в работе.

Поступила 9 III 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Попов В. И., Хабахпашева Е. М. К гидродинамике жидкостей с переменной вязкостью. ПМТФ, 1966, № 1, стр. 45—49.
2. Hauness R. H., Burton A. C. Role of the non-newtonian behavior of blood in hemodynamics. Americ. J. Physiol., 1959, vol. 197, No. 5, pp. 943—950.
3. Serny L. C. A region of newtonian flow for whole blood. Biorheology, 1963, vol. 1, No. 3, pp. 159—165.

УДК 532.54

#### ЗАВИСИМОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТА ПРИ МАЛЫХ СКОРОСТЯХ ФИЛЬТРАЦИИ

*Р. Скавиньски*

(Краков)

Приведены экспериментальные данные о зависимости коэффициента фильтрации раствора  $\text{CaCl}_2$  в пористой среде, состоящей из зерен кварца, от гидравлического градиента.

При описании течения жидкости в пористой среде фундаментальную роль играет формула

$$v = kH \quad (1)$$

Она связывает единичный расход жидкости (скорость фильтрации)  $v$  с гидравлическим градиентом  $H$  в направлении течения. Гидравлическая проводимость (коэффи-

цент фильтрации)  $k$  просто связана с проницаемостью пористого материала. Ее величина зависит от геометрии пор и от свойств жидкости, причем для каждой пары пористое тело — жидкость существует область скоростей фильтрации, в которой эта величина постоянна и применим закон Дарси.

В то же время, в ряде экспериментов было замечено нелинейное изменение скорости фильтрации жидкости по мере уменьшения гидравлического градиента, так что уменьшение градиента влечет за собой уменьшение коэффициента  $k$ . Впервые это явление описал Кинг [1], позднее оно отмечалось и другими исследователями [2, 3]. С указанными эффектами тесно связано возникновение предельного гидравлического градиента при фильтрации: при значениях градиента, меньших некоторого предельного значения, фильтрация практически прекращается.

Большинство опытов по определению предельного гидравлического градиента проводилось на различных естественных пористых средах (пески, песчаники, трещиноватые породы, лессы, глины).

Все эти материалы содержат определенное количество илстых минералов, которые в связи с малым размером и особым кристаллическим строением их зерен сильно взаимодействуют с водными растворами. На поверхности таких зерен происходят определенные физико-химические явления, приводящие к образованию поверхностных слоев раствора, свойства которого существенно отличаются от свойств чистого фильтрующегося раствора. Если толщина таких слоев сравнима по величине с характерным диаметром поровых каналов, то их влияние на фильтрацию может быть весьма значительным. С наличием в пористом теле таких илстых материалов связаны и известные теоретические объяснения обсуждаемого эффекта.

В связи с этим имеет значение вопрос, будет ли наблюдаться нелинейное изменение гидравлической проводимости при фильтрации в пористой среде, совсем не содержащей илстых минералов. Решению этой задачи и посвящена эта заметка.

В экспериментах использовалась искусственная пористая среда, представляющая собой насадку зерен кварцевого стекла, раздробленного до достижения определенной дисперсности. Выбор такой среды был обусловлен следующими основными соображениями:

- 1) эта среда совершенно не содержит илстых минералов или родственных алюмосиликатов;
- 2) кварцевое стекло совершенно нерастворимо в воде и не содержит в своем составе металлических катионов, которые могли бы изменить ионный состав фильтрующегося раствора;
- 3) форма зерен различных размеров, получающихся при дроблении кварцевого стекла, примерно одинакова.

В опытах были использованы насадки, состоящие из зерен следующей дисперсности: 0,2—0,4, 0,4—0,6, 0,6—0,8, 0,8—1,0, 1,0—1,2 мм.

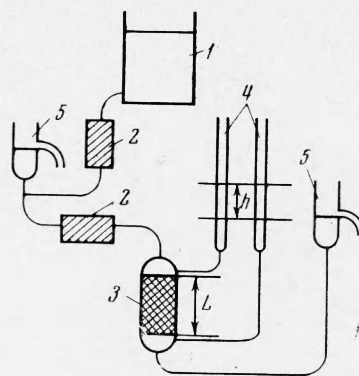
Для предотвращения неконтролируемых отклонений в составе катионов фильтрующейся жидкости вместо дистиллированной воды использован раствор  $\text{CaCl}_2$  с концентрацией  $10^{-3}$  г. экв/л.

Схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1. Всю установку (вместе с питающим резервуаром 1) термостатировали в специальной камере при 26,8—27,2° С. Пористую насадку высотой ~10 см помещали в вертикальном цилиндрическом сосуде 3 с площадью поперечного сечения 10 см<sup>2</sup>, при этом обеспечивали полное обводнение зерен кварцевого стекла и наиболее плотную достижимую упаковку их в насадке. Перед вводом в насадку раствор очищали от возможных взвешенных частиц при помощи двух пористых фильтров 2, состоящих из зерен кварцевого стекла, дисперсность которых была ниже, чем зерен в насадке. Для обеспечения стабильности перепада давления в насадке использовали переливные сосуды 5. Разность уровней в пьезометрических трубках 4 измерялась при помощи катетометра, расход измеряли, взвешивая жидкость, протекающую через систему за данный промежуток времени.

Коэффициент фильтрации рассчитывали по формуле

$$k = \frac{QL}{Ah} = \frac{Q}{Ah}$$

Здесь  $A$  — площадь поперечного сечения насадки, равная 10 см<sup>2</sup>;  $Q$  — расход, измеренный с точностью 0,1%;  $L$  — высота насадки, постоянная во всех опытах и равная

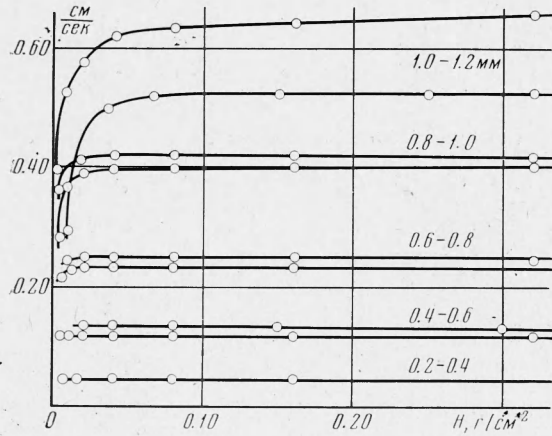


Фиг. 1

10 см с точностью 0.5%;  $h$  — задаваемая в экспериментах разность пьезометрических уровней (точность определения этой величины варьировала от 10% при  $h = 0.05$  см до 0.1% при  $h = 3.2$  см).

Полная ошибка измерения могла составлять до 12% при минимальных использованных значениях гидравлического градиента и  $\sim 0.1\%$  при максимальных.

Результаты расчета величины  $k$ , проведенного на основе данных двух независимых серий опытов, представлены на фиг. 2, где приведены отдельные экспериментальные



Фиг. 2

точки и соответствующие зависимости  $k$  от гидравлического градиента  $H$  при разных размерах зерен (цифры у кривых). Кривые на фиг. 2 убедительно свидетельствуют о наличии уменьшения гидравлической проводимости с убыванием гидравлического градиента в области малых градиентов даже в случае, когда фильтрация происходит в среде, свободной от каких-либо илистых веществ. Этот эффект особенно заметен для насадок из крупных зерен (фракции 1.0—1.2 мм при  $H \lesssim 0.08$  и 0.8—1.0 мм при  $H \lesssim 0.04$ ) и исчезает при переходе к насадкам более мелких зерен и с увеличением  $H$ . Так, для фракций 0.2—0.4 мм и 0.4—0.6 мм указанное нелинейное изменение  $k$  в области  $H$  от 0.005 до 0.32 вообще обнаружено не было. О существовании такого эффекта можно только догадываться при  $H < 0.005$  для этих и более мелких фракций.

Совершенно новым обстоятельством, обнаруженным в описанных экспериментах, является существенное возрастание эффекта изменения коэффициента фильтрации по мере увеличения размеров зерен, а следовательно, и размеров пор среды. Если для среды с размером зерен 0.8 мм и выше наличие эффекта несомненно, то для сред с характерным размером зерен 0.4 мм и ниже этот эффект либо вообще не имеет места, либо ничтожно мал.

Указанное обстоятельство свидетельствует, возможно, о том, что причины нелинейного изменения коэффициента фильтрации нужно искать не только в физико-химических, но и в чисто гидравлических факторах.

Поступила 26 II 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. King F. H. Principles and conditions of the movements of ground water. U. S. Geol. Surv. Rept. 1897—1898, pt 2, pp. 59—294.
2. Роза С. А. К вопросу о начальном градиенте напора при фильтрации воды через бетон. Гидротехн. стр-во, 1961, № 6.
3. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917—1967). М., «Наука», 1969, стр. 13—17.