

В. Л. Поляков

К расчету коэффициента фильтрации суффозионных грунтов

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А. Я. Олейником)

Разработаны формулы для расчета коэффициента фильтрации несвязного грунта до начала и после завершения процесса механической суффозии. Сопоставлены теоретические и экспериментальные значения указанных коэффициентов для модельных суффозионных грунтов. На многочисленных примерах иллюстрируется изменение проницаемости грунта в зависимости от концентрации и размеров суффозионных частиц.

Большинство несвязных и некоторые связные грунты на Украине, в Белоруси являются суффозионными [1, 2]. Они включают структурную (скелет) и неструктурную (суффозионную) компоненты, которые имеют существенно различающиеся физико-механические свойства. В свою очередь, любая из этих компонент может состоять из нескольких фракций. Но если в принципе возможно введение пары эквивалентных диаметров — D (для крупных, структурных) и d (для более мелких, неструктурных частиц), то оправдано определять фильтрационные характеристики и, в первую очередь, коэффициент фильтрации пористой среды, исходя из раздельного учета механического воздействия указанных компонент на фильтрационный поток.

Очевидно, что соответствующие силы сопротивления пропорциональны скорости, как правило, ламинарного течения жидкости (фильтрации). Коэффициенты же пропорциональности ввиду исключительной сложности строения грунтов в каждом конкретном случае следует находить эмпирическим путем. Иногда, однако, удается избежать проведения трудоемких опытов, привлекая для этого уже имеющиеся экспериментальные наработки и их обобщения [3]. Наиболее удачной в этом отношении следует признать формулу Козени-Кармана, которая на протяжении нескольких десятилетий с успехом применяется для расчета гидравлических характеристик песчаных, несущих суффозионных грунтов; зернистых загрузок водоочистных фильтров. Содержание неструктурных частиц в природных пористых средах обычно сравнительно малое, что дает возможность распространить указанную формулу и на суффозионные грунты. Но прежде всего эта формула просто адаптируется для определения проницаемости K_{se} подобного грунта после полного завершения в нем деформаций (все суффозионные частицы вымыты)

$$K_{se} = \frac{(1 - m_s)^3 D^2}{180m_s^2}, \quad (1)$$

где m_s — объемная концентрация частиц скелета. Формула (1) после соответствующей корректировки может использоваться для нахождения проницаемости структурной компоненты двухкомпонентного двухфракционного грунта, а именно,

$$K_s = \frac{n^3 D^2}{180m_s^2(n + m_s)}, \quad (2)$$

где $n = 1 - m_s - m$, n и m — текущие пористость грунта и объемная концентрация суффозионных частиц. Если теперь совокупность таких частиц формально рассматривать как специальную пористую среду, в которой неструктурные частицы будут играть роль структурных, то на базе традиционного представления порового пространства в виде пучка пор — капилляров для ее проницаемости K_c выводится следующее выражение:

$$K_c = \frac{n^3 d^2}{180 m^2 (n + m)}. \quad (3)$$

Сила сопротивления фильтрационному течению жидкости F_r в общем случае будет [4, 5]

$$F_r = \frac{\mu}{K} V, \quad (4)$$

где μ — динамическая вязкость; V — скорость фильтрации; K — проницаемость среды. Тогда из равенства сил сопротивления со стороны выделенных неподвижных компонент фактической силе для исходного грунта вытекает связь между ее общей проницаемостью K_0 и нововведенными проницаемостями K_{s0} , K_{c0} в виде

$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{K_{s0}} + \frac{1}{K_{c0}}, \quad (5)$$

где K_{s0} , K_{c0} — значения K_s , K_c при $m = m_0$; m_0 — объемная концентрация суффозионных частиц в недеформированном грунте. И, следовательно, для проницаемости K_0 с учетом выражений (2), (3) можно предложить следующую формулу:

$$K_0 = \frac{n_0^3 D^2}{180 m_s^2 (n_0 + m_s)} \left[1 + \left(\frac{m_0 D}{m_s d} \right)^2 \frac{n_0 + m_0}{n_0 + m_s} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Согласно (1) и (6), максимальное относительное приращение коэффициента фильтрации k_e в результате предельного деформирования среды составит

$$\bar{k}_e = \frac{k_e}{k_0} = \frac{K_{se}}{K_0} = \frac{(n_0 + m_0)^3 (n_0 + m_s)}{n_0^3} \left[1 + \left(\frac{m_0 \bar{D}}{m_s} \right)^2 \frac{n_0 + m_0}{n_0 + m_s} \right], \quad (7)$$

где k_0 — коэффициент фильтрации исходного грунта; $\bar{D} = D/d$.

Как известно [6], характерное время суффозионного процесса обычно намного меньше, чем фильтрационного. После завершения перераспределения и выноса из грунта неструктурных частиц почти во всей области деформаций остаются лишь частицы скелета. При этом коэффициент фильтрации (проницаемость) предельно деформированного грунта достигает максимального значения k_e . Превышение им исходного значения k_0 дает представление о серьезности происшедших в грунте деформаций и о их возможных последствиях для водно-физической картины в целом. Вообще же аккуратное определение относительной величины \bar{k}_e способствует достоверному прогнозу действия дренажа в суффозионных грунтах, надежному обоснованию их параметров. В частном случае исчезающе малого содержания неструктурных частиц ($m \rightarrow 0$) из (7) вытекает

$$\bar{k}_e \rightarrow n_0 + m_s = 1.$$

Формула (3) несколько занижает величину K_c , поскольку изначально завышается гидродинамическое взаимодействие указанных частиц. Верхнюю же границу интервала возможных значений K_c можно найти, пренебрегая подобным взаимодействием. Тогда суммарная сила сопротивления F_c , возникающая при обтекании совокупности суффозионных частиц со скоростью V/n , будет

$$F_c = \frac{3mC_w\rho_l}{4dn^2}V^2, \quad (8)$$

где C_w — коэффициент сопротивления; ρ_l — плотность жидкости. Так как даже вблизи таких сильных источников возмущения фильтрационного режима, какими являются дрены, течение обычно остается ламинарным, то для оценки коэффициента C_w можно воспользоваться известным точным выражением

$$C_w = \frac{24}{Re} = \frac{24n\nu}{Vd}, \quad (9)$$

где ν — кинематическая вязкость. С учетом (9) сила F_c станет

$$F_c = \frac{18\nu m\rho_l}{nd^2}V. \quad (10)$$

Если теперь приравнять силы F_c и F_r (при $K = K_c$), то для K_c справедлива формула

$$K_c = \frac{18m}{nd^2}. \quad (11)$$

Ее, кстати, несложно уточнить, приняв во внимание вышеупомянутое взаимодействие. Тогда достаточно ввести в формулу корректив, зависящий от m и d . После подстановки в (5) выражений (2), (11) и несложных преобразований с учетом $n = n_0$, $m = m_0$ получаем

$$K_0 = \frac{n_0^3 D^2}{180m_s^2(n_0 + m_s)} \left[1 + \frac{0,1m_0}{n_0 + m_s} (n_0 \bar{D})^2 \right]^{-1}. \quad (12)$$

Следовательно, относительная величина \bar{k}_e в таком случае с учетом (1) и (12) будет

$$\bar{k}_e = \frac{(n_0 + m_0)^3 (n_0 + m_s)}{n_0^3} \left[1 + \frac{0,1m_0}{n_0 + m_s} (n_0 \bar{D})^2 \right]. \quad (13)$$

При развитии в несвязном грунте механической суффозии удобно в фильтрационных расчетах вместо общепринятых проницаемости и коэффициента фильтрации (для неподвижной твердой фазы) использовать их эффективные значения $K_{эф}$, $k_{эф}$. С помощью последних удастся дополнительно учитывать воздействие на фильтрационное течение подвижной неструктурной компоненты, оставаясь при этом в рамках традиционного представления для уравнения движения. Приняв во внимание, что разница между скоростями жидкости и частиц равна u_k , и разделив общую силу сопротивления на две составляющие (со стороны скелета и суффозионной компоненты), можно записать [7]

$$\frac{nu}{K_{эф}} = \frac{nu}{K_s} + \frac{nu_k}{K_c} = \frac{g}{\nu} \frac{\partial h}{\partial r}, \quad (14)$$

где ν — кинематическая вязкость; h — пьезометрический напор. Из (14) вытекает, что

$$K_{\text{эф}} = \frac{\bar{u}K_sK_c}{K_s + \bar{u}K_c}. \quad (15)$$

Подстановка выражений для K_s , K_c (2), (3) в (15) после несложных преобразований дает

$$K_{\text{эф}} = \frac{n^3D^2}{180m_s^2(n + m_s)} \left[1 + \frac{1}{\bar{u}} \left(\frac{m}{m_s} \bar{D} \right)^2 \frac{n + m}{n + m_s} \right]^{-1}. \quad (16)$$

Очевидно, что при отсутствии суффозионных частиц ($m = 0$) $K_{\text{эф}} = K_{s0} = K_0$. Если же суффозионные частицы ассоциированы с жидкостью ($u_k = 0$), то $\bar{u} \rightarrow \infty$ и $K_{\text{эф}} = K_s$. Наконец, при равенстве скорости частицы u_k будет $\bar{u} = 1$ и $K_{\text{эф}} = K_sK_c/(K_s + K_c)$. Следует заметить, что при $\bar{u} > 1$ (условие соблюдается везде внутри области деформаций) $K_{\text{эф}} > K_0$.

Явление фактически скачкообразного увеличения проницаемости несвязной пористой среды вначале ее деформирования можно трактовать как кризис сопротивления.

Сравнение формул (7) и (13) на примерах с типичными значениями m_0 , n_0 , d показало, что несмотря на существенную разницу в трактовке гидродинамического действия суффозионной компоненты, значения K_c отличались незначительно (на десятки процентов). А поскольку основной вклад в общую силу сопротивления дает именно скелет грунта, то достаточно ограничиться ориентировочными значениями K_c . В дальнейшем предпочтение было отдано формулам (3), (7), что, впрочем, не принципиально. Непосредственно об оправданности их использования в инженерных расчетах фильтрационного процесса в дренируемых суффозионных грунтах свидетельствует сопоставление теоретических и экспериментальных значений проницаемости после окончания деформаций. Привлекались опытные данные из работы [8], полученные для модельных суффозионных грунтов в секторном лотке. Серии экспериментов проводились с грунтами, сложенными благодаря тщательной калибровке из крупных частиц примерно одного размера ($D = 0,387$ или $0,465$ мм) и отсортированных мелких частиц ($d = 0,13; 0,18$ или $0,26$ мм). При этом пористость такой смеси менялась в незначительных пределах (от $0,348$ до $0,384$). Концентрация неструктурных частиц составила по массе 10% от концентрации структурных. Вода в надлежащим образом подготовленный грунт подавалась из дрены под повышенным напором, что обеспечило интенсивную мобилизацию и оттеснение суффозионных частиц к внешней границе фильтрующего массива.

Судя по результатам множества измерений напора в ближней к дрене и дальней зонах, подавляющая часть указанных частиц вообще выносилась из исследуемого грунта. Тем не менее, для сопоставительного анализа выбирались значения коэффициента фильтрации зоны, в которой гидродинамическая сила была наибольшей. Уместно заметить, что благодаря малой начальной концентрации суффозионных частиц даже их полное удаление не приводило к изменениям структуры среды. Для каждого набора исходных данных (D , d , n_0) опыты выполнялись трижды. По трем эмпирическим значениям \bar{k}_e здесь вычислялось среднее значение этого коэффициента. Таким образом, в итоге были найдены четыре значения \bar{k}_e (отвечали значениям $\bar{D} = 2,755; 2,584; 1,988; 1,789$), которые нанесены крестиками на рис. 1. Кроме того, рассчитаны кривые зависимости $\bar{k}_e(\bar{D}^{-1})$ по формулам (7) и (13) при $m_0 = 0,1m_s$, также представленные на рис. 1, откуда видно, что экспериментальные точки расположены близко к обоим расчетным графикам. Этот факт подтверждает правомерность применения обеих формул для \bar{k}_e в фильтрационных расчетах, хотя несколько

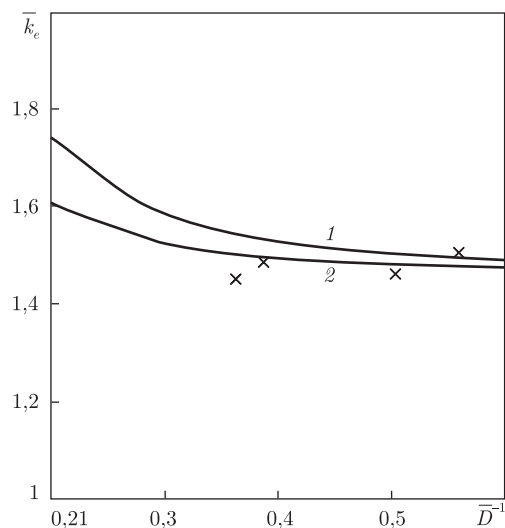


Рис. 1. Графики зависимости $\bar{k}_e(\bar{D}^{-1})$: 1 — по формуле (13); 2 — по формуле (7); — — теория; + — эксперимент

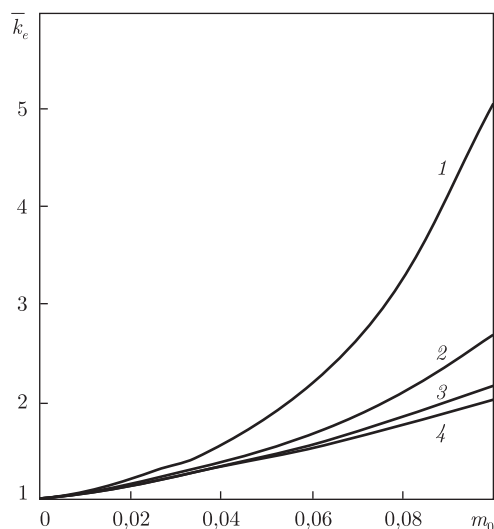


Рис. 2. Графики зависимости $\bar{k}_e(m_0)$: 1 — $\bar{d} = 0,1$; 2 — $\bar{d} = 0,2$; 3 — $\bar{d} = 0,3$; 4 — $\bar{d} = 0,5$

предпочтительнее выглядят результаты, полученные с помощью формулы (7). Поэтому последующие расчеты проводились именно на базе этой формулы.

Очевидно, что сопротивление фильтрационному потоку тем больше, чем больше суммарная поверхность неструктурных частиц. Ее площадь тесно связана с диаметром и количеством частиц. В связи с этим представляет интерес зависимость коэффициента \bar{k}_e от концентрации m_0 и отношения \bar{D} . Семейства кривых $\bar{k}_e(m_0)$, $\bar{k}_e(\bar{D}^{-1})$ были рассчитаны при значениях m_0 и \bar{D} , менявшихся непрерывно или дискретно в широких пределах, и показаны на рис. 2, 3. Из рис. 2 следует, что повышенное содержание суффозионных частиц может стать причиной, во-первых, сравнительно низкой проницаемости недеформированного грунта, во-вторых, резкого ее увеличения при эксплуатации дренажа, инициирующего механическую суффозию. Аналогичные последствия будет иметь и гипотетическое увеличе-

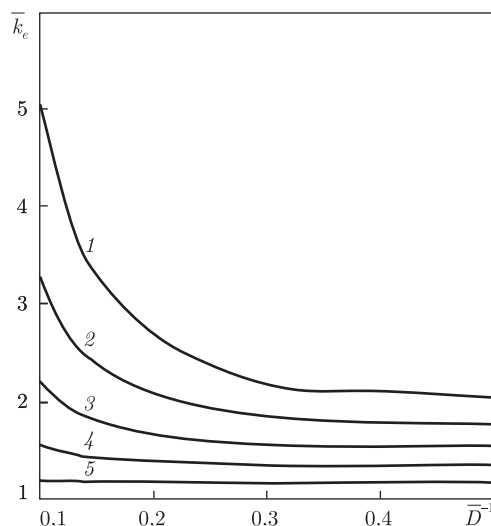


Рис. 3. Графики зависимости $\bar{k}_e(\bar{D}^{-1})$: 1 – $m_c = 0,1$; 2 – $m_c = 0,08$; 3 – $m_c = 0,06$; 4 – $m_c = 0,04$; 5 – $m_c = 0,02$

ние размеров неструктурных частиц. Наибольшую чувствительность величина \bar{k}_e демонстрирует по отношению к концентрации m_0 при больших ее значениях, а по отношению к \bar{D} , наоборот, при малых ($d \ll D$).

Итак, в результате удаления всех суффозионных частиц коэффициент фильтрации грунта может возрасти на десятки процентов, а в отдельных случаях даже в несколько раз. Благодаря этому механическая суффозия, несмотря на локальный характер деформаций, способна оказывать значимое влияние на фильтрационный режим всего дренируемого грунта. Рекомендованные для расчета коэффициентов фильтрации суффозионных грунтов формулы можно считать практически равноценными. Однако для окончательного выбора расчетной формулы все-таки необходимо проведение экспериментов с модельными суффозионными грунтами, неструктурная компонента которых сложена из особо мелких частиц.

1. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л. и др. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления. – Киев: Изд. Ин-та гидромех. НАН Украины, 2000. – 332 с.
2. Мурашко А. И., Сапожников Е. Г. Защита дренажа от заиления. – Минск: Ураджай, 1978. – 168 с.
3. Yucovic M., Soro A. Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition. – Littleton, Colorado: Water Res. Publ., 1992. – 69 p.
4. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. – Москва: Наука, 1977. – 664 с.
5. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917–1967). – Москва: Наука, 1969. – 545 с.
6. Сидор В. Б. Порівняльний аналіз значущості суфозійного та фільтраційного процесів при функціонуванні різних типів дренажів // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідраліки. – 2005. – Вип. 5. – С. 120–128.
7. Поляков В. Л. К вопросу о фильтрационных деформациях в несвязных грунтах // Доп. НАН України. – 2003. – № 3. – С. 47–52.
8. Дмитриев А. Ф., Хлапук Н. Н., Дмитриев Д. А. Деформационные процессы в несвязных грунтах в придренной зоне и их влияние на работу осушительно-увлажнительных систем. – Ровно: Изд-во РГТУ, 2002. – 145 с.

В. Л. Поляков

До розрахунку коефіцієнта фільтрації суфозійних ґрунтів

Розроблено формули для розрахунку коефіцієнта фільтрації незв'язного ґрунту до початку і після завершення процесу механічної суфозії. Зіставлено теоретичні і експериментальні значення вказаних коефіцієнтів для модельних суфозійних ґрунтів. Багаточисленні приклади ілюструють зміну проникності ґрунту залежно від концентрації і розмірів суфозійних частинок.

V. L. Polyakov

On the calculation of the non-cohesion soil hydraulic conductivity

Formulae have been developed for calculating the hydraulic conductivity of non-cohesion soils before the onset and after the completion of the mechanical suffosion. A good correspondence has been established between theoretical and experimental data on the conductivity for model soils. Changes in the soil permeability depending on the concentration and the size of nonstructural particles have been illustrated by numerous examples.