

УДК 532.546:631.62

В.Л. ПОЛЯКОВ, доктор технических наук
Институт гидромеханики НАН Украины

УСТАНОВИВШИЙСЯ ПРИТОК ЖИДКОСТИ К ТРУБОФИЛЬТРУ В СУФФОЗИОННОМ ГРУНТЕ

Сформульовано стаціонарну задачу притоку рідини до трубофільтра з непроникними для твердих часток стінками в суфозійному ґрунті. Одержано її розв'язок при припущенні про рівномірний розподіл мобілізованих часток в утвореному слабо проникному прошарку. З використанням нової теоретичної формули для коефіцієнта фільтрації суфозійного ґрунту виконано на багаточисленних прикладах з типовими вихідними даними оцінку значущості локального ущільнення ґрунту для фільтраційного процесу.

Ключові слова: трубофільтр; суфозійний ґрунт; фільтраційні деформації; випаровування; зволожуюча дрена.

Сформулирована стационарная задача притока жидкости к трубофильтру с непроницаемыми для твердых частиц стенками в суффозионном грунте. Получено ее решение в предположении равномерного распределения мобилизованных частиц в образованном слабопроницаемом прослое. С использованием новой теоретической формулы для коэффициента фильтрации суффозионного грунта выполнены на многочисленных примерах с типичными данными оценки значимости локального уплотнения грунта для фильтрационного процесса.

Ключевые слова: трубофильтр; суффозионный грунт; фильтрационные деформации; испарение; увлажняющая дрена.

A steady-state task has been formulated of groundwater flow to tube filter with impermeable for solid particles walls with regard to cohesionless soil. Its solution has been obtained for uniform distribution of mobilized particles within low-permeability sublayer. Using a theoretical formula for hydraulic conductivity of cohesionless soils, estimates have been performed of soil local packing significance for the above flow at numerous examples with typical initial data.

Key words: tube filter; cohesionless soil; evaporation; hydrodynamic deformation; wetting drain.

Достаточно широкое применение в водохозяйственной практике нашли трубчатые дрены с пористыми стенками, т.е. трубофильтры [1-5]. Несмотря на относительно высокую стоимость, они используются в гидротехническом, мелиоративном строительстве, технологиях водоочистки. Популярность трубофильтров объясняется надежностью и долговечностью дренажных конструкций на их основе. Благодаря специфическим физико-механическим свойствам трубофильтров отпадает потребность в устройстве дренажных фильтров, снижается до минимума риск заиления дренажных и водоотводящих сетей.

Трубофильтры и дренажные фильтры периодически работают в условиях интенсивного притока жидкости, что обуславливает рост инерционных сил и в связи с этим нарушение линейности фильтрации, дополнительные потери напора. Поэтому в теоретических исследованиях действия таких дрен оправдано использовать закон нелинейной фильтрации. Общепринятой является его двухчленная форма [6-9]

$$a_f V + b_f V^2 = \frac{dh_f}{dr}, \quad (1)$$

где h_f – напор в стенке трубофильтра (дренажном фильтре). При деформировании суффозионных грунтов под влиянием трубофильтра в зависимости от соотношения между размерами (диаметрами) его пор и неструктурных частиц могут сложиться две характерные и принципиально различающиеся ситуации. В первой из них подвижные частицы не в состоянии даже проникнуть в стенку. Поэтому они скапливаются в порах грунта вблизи дрены, тем самым создавая весьма серьезное препятствие фильтрационному течению. Естественно, что толщина и проницаемость образующегося таким образом слабопроницаемого прослоя тесно связаны с объемом мобилизованного твердого вещества и плотностью его упаковки в межзерновом пространстве. Также подобный слой может образоваться на границе между фильтром и грунтом вследствие многократного изменения здесь градиента напора, что приводит к столь же значительному снижению гидродинамической силы в фильтре и, как следствие, усиленной иммобилизации суффозионных частиц на указанной границе [10-13]. Во второй ситуации поры в трубофильтре достаточно большие, чтобы пропустить суффозионные частицы. Попадая внутрь дрены, они или ее заиливают, или уносятся в систему коллекторов, каналы, где также могут осаждаться. Кстати, случается, например, в практике водоочистки, что внутрь стенки проникают и затем в ней задерживаются более мелкие из подвижных частиц. Но измеренные гидравлические потери за счет ее кольматажа оказались минимальными [14], что свидетельствует о несущественности этого явления. Ниже детально изучается аналитическими методами более сложная первая ситуация, а вторая, но при линейной фильтрации и для традиционного дренажа, рассматривалась в предыдущих двух разделах.

Только адекватное формальное описание процессов мобилизации, транспорта и осаждения суффозионных частиц вблизи трубофилтра в комплексе способно послужить надежной теоретической базой для моделирования изменений в физико-механическом состоянии дренируемого несвязного грунта вплоть до его окончательной стабилизации. Именно таким образом можно получить истинное распределение иммобилизованного вещества в прослой кольматажа. Однако, для этого необходимо численно решить сложную краевую задачу в частных производных с неизвестными подвижными границами. Конечно, строить такое решение крайне затруднительно, а с практической точки зрения и нецелесообразно. Поэтому в дальнейшем характер распределения неструктурного вещества существенно упрощается, что, впрочем, не должно приводить к значительным ошибкам в фильтрационных расчетах.

Итак, предполагается, что все первоначально мобилизованное неструктурное вещество, в конце концов, равномерно распределяется в зоне предельного насыщения суффозионными частицами (прослой кольматажа). Здесь использована гипотеза об ограниченной способности грунтов вмещать в своем поровом пространстве дисперсную примесь. Ее правомочность вытекает из известного факта об изменении пористости разнообразных грунтов в узких пределах, а также косвенно подтверждается экспериментальными данными. Так, в задачах фильтрования слабоконцентрированных суспензий через зернистые среды даже введен специальный термин «грязеемкость» для обозначения максимального объема пор, который может быть заполнен осадком [15-18]. Итак, теоретические исследования установившегося действия трубофилтра (дренажного филтра) в грунте, подвергшемуся внешней суффозии, будут выполняться на основе следующей упрощенной математической модели. Прежде всего, путем объединения уравнений неразрывности и движения (1) выводится уравнение фильтрации в стенке дрены

$$\frac{d}{dr} \left[r \left(\sqrt{a_f^2 + 4b_f \frac{dh_f}{dr}} - a_f \right) \right] = 0, \quad R_d \leq r \leq R_f, \quad (2)$$

где R_d, R_f – радиусы внутренней и внешней поверхностей указанной стенки. К нему присоединяются стационарные уравнения фильтрации относительно напоров h_p, h_e, h_0 в зонах, соответственно, предельного насыщения суффозионными частицами ($R_f < r \leq R_p$), предельной деформации ($R_p < r \leq R_k$) и недеформированного грунта ($R_k < r \leq R$)

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dh_j}{dr} \right) = 0, \quad j = p, e, 0. \quad (3)$$

На дрене и контуре питания ($r = R$) принимаются обычные условия первого рода

$$r = R_d, \quad h_f = H_d; \quad r = R, \quad h_0 = H_R; \quad (4)$$

а на внутренних границах – условия четвертого рода

$$r = R_f, \quad \frac{1}{2b_f} \left(\sqrt{a_f^2 + 4b_f \frac{dh_f}{dr}} - a_f \right) = k_p \frac{dh_p}{dr}; \quad h_f = h_p; \quad (5)$$

$$r = R_p, \quad h_p = h_e; \quad k_p \frac{dh_p}{dr} = k_e \frac{dh_e}{dr}; \quad (6)$$

$$r = R_k, \quad h_e = h_0; \quad k_e \frac{dh_e}{dr} = k_0 \frac{dh_0}{dr}; \quad (7)$$

где k_p, k_e, k_0 – коэффициенты фильтрации в вышеупомянутых зонах, R_p, R – радиус прослоя и контура питания.

Общее решение задачи (2)-(7) выражается следующим образом

$$h_f = \frac{1}{4b_f} \left(2a_f A_f \ln r - \frac{A_f^2}{r} \right) + B_f, \quad (8)$$

$$h_j = A_j \ln r + B_j. \quad (9)$$

Из условий сопряжения расходов (5)-(7) находятся соотношения между константами A_f и A_j

$$\frac{A_f}{2b_f} = k_p A_p = k_e A_e = k_0 A_0 = \frac{q_\infty}{2\pi}, \quad (10)$$

где q_∞ – установившийся погонный дренажный расход. С использованием (10) и остальных граничных условий функции напоров в стенке дрены и выделенных зонах грунта в конце концов принимают вид

$$h_f(r) = H_d - \frac{b_f q_\infty^2}{4\pi^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_d} \right) + \frac{a_f q_\infty}{2\pi} \ln \frac{r}{R_d}, \quad R_d \leq r \leq R_f; \quad (11)$$

$$h_p(r) = H_R + \frac{q_\infty}{2\pi k_p} \ln \frac{r}{R_p} + \frac{q_\infty}{2\pi k_e} \ln \frac{R_p}{R_k} + \frac{q_\infty}{2\pi k_0} \ln \frac{R_k}{R}, \quad R_f < r \leq R_p; \quad (12)$$

$$h_e(r) = H_R + \frac{q_\infty}{2\pi k_e} \ln \frac{r}{R_k} + \frac{q_\infty}{2\pi k_0} \ln \frac{R_k}{R}, \quad R_p < r \leq R_k; \quad (13)$$

$$h_0(r) = H_R + \frac{q_\infty}{2\pi k_0} \ln \frac{r}{R}, \quad R_k < r \leq R. \quad (14)$$

Поскольку полные потери напора в области фильтрации известны по условиям задачи, то из системы уравнений (11)-(14) легко вывести уравнение относительно неизвестной величины q_∞

$$\begin{aligned} h_0(R) - h_f(R_d) &= H_R - H_d = \\ &= \Delta h = \frac{b_f q_\infty^2}{4\pi^2} \left(\frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_f} \right) + \frac{a_f q_\infty}{2\pi} \ln \frac{R_f}{R_d} + \frac{q_\infty}{2\pi k_p} \ln \frac{R_p}{R_f} + \frac{q_\infty}{2\pi k_e} \ln \frac{R_k}{R_p} + \frac{q_\infty}{2\pi k_0} \ln \frac{R}{R_k}. \end{aligned} \quad (15)$$

Но, чтобы вести расчеты с помощью уравнения (15), прежде всего, необходимо конкретизировать положение границ между зонами предельного

насыщения, предельных деформаций и недеформированного грунта. Радиус второй границы находится из выражения для погонного фильтрационного расхода на ней и поэтому выражается через критические градиент I_k и скорость u_k

$$R_k = \frac{q_\infty}{2\pi k_0 I_k} = \frac{q_\infty}{2\pi k_0 u_k (1 - m_s - m_0)}, \quad (16)$$

где m_s , m_0 – объемные концентрации частиц скелета и суффозионных частиц в недеформированном грунте. Радиус же первой границы определяется из баланса суффозионных частиц в области деформаций

$$\pi m_0 (R_k^2 - R_p^2) = \pi m_p (R_p^2 - R_f^2), \quad (17)$$

где m_p – объемная концентрация суффозионных частиц в первой зоне (предельного насыщения). Из (17) следует искомое выражение для $R_p(q_\infty)$

$$R_p = \sqrt{\frac{m_0 R_k^2(q_\infty) + m_p R_f^2}{m_0 + m_p}}. \quad (18)$$

Наконец, необходимо иметь полную информацию о проницаемости грунта во всей области фильтрации, то есть в рассматриваемых условиях должен быть известен набор значений коэффициентов k_f , k_p , k_e , k_0 . Естественно, что с высокой достоверностью они могут определяться только экспериментальными методами. Вместе с тем, именно для несвязных грунтов и коэффициентов фильтрации k_p , k_e , k_0 оправдано использовать в качестве базовой формулу Козени-Кармана и изложенную в [19,20] методику расчета ключевой фильтрационной характеристики. В отсутствии деформаций уравнение (15) упрощается к виду

$$\Delta h = \frac{b_f q_{\infty 0}^2}{4\pi^2} \left(\frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_f} \right) + \frac{a_f q_{\infty 0}}{2\pi} \ln \frac{R_f}{R_d} + \frac{q_{\infty 0}}{2\pi k_0} \ln \frac{R}{R_f}.$$

В такой форме уравнение уже может быть разрешено относительно расхода $q_{\infty 0}$ и тогда

$$q_{\infty 0} = \frac{\pi R_d R_f}{b_f (R_f - R_d)} \left[\sqrt{\left(a_f \ln \frac{R_f}{R_d} + \frac{1}{k_0} \ln \frac{R}{R_f} \right)^2 + \frac{4b_f (R_f - R_d) \Delta h}{R_d R_f}} - a_f \ln \frac{R_f}{R_d} - \frac{1}{k_0} \ln \frac{R}{R_f} \right]. \quad (19)$$

В частном случае линейной фильтрации $a_f = 1/k_0$, $b_f = 0$.

Для представления расчетных зависимостей и уравнения в безразмерной форме вводятся относительные величины: $\tilde{h}_j = (h_j - H_d)/\Delta h$, $\bar{r} = r/R_d$; $\bar{a}_f = k_0 a_f$, $\bar{b}_f = k_0^2 \Delta h b_f / R_d$; $\bar{I}_k = I_k / I_0$, $I_0 = \Delta h / R_d$; $\bar{q}_\infty = q_\infty / (2\pi R_d u_k (1 - m_s))$; $\bar{R}_{f,p,k} = R_{f,p,k} / R_d$, $\bar{R} = R / R_d$; $\bar{k}_{f,p,e} = k_{f,p,e} / k_0$. Тогда

распределение приведенного напора в области фильтрации описывается системой зависимостей

$$\tilde{h}_f(\bar{r}) = \frac{\bar{b}_f \bar{I}_k^2 \bar{q}_\infty^2}{(1 - \tilde{m}_0)^2} \left(\frac{1}{\bar{r}} - 1 \right) + \frac{\bar{a}_f \bar{I}_k}{1 - \tilde{m}_0} \bar{q}_\infty \ln \bar{r}, \quad 1 \leq \bar{r} \leq \bar{R}_f; \quad (20)$$

$$\tilde{h}_p(\bar{r}) = 1 + \frac{\bar{I}_k \bar{q}_\infty}{1 - \tilde{m}_0} \left(\frac{1}{\bar{k}_p} \ln \frac{\bar{r}}{\bar{R}_p} + \frac{1}{\bar{k}_e} \ln \frac{\bar{R}_p}{\bar{R}_k} + \ln \frac{\bar{R}_k}{\bar{R}} \right), \quad \bar{R}_f < \bar{r} \leq \bar{R}_p; \quad (21)$$

$$\tilde{h}_e(\bar{r}) = 1 + \frac{\bar{I}_k \bar{q}_\infty}{1 - \tilde{m}_0} \left(\frac{1}{\bar{k}_e} \ln \frac{\bar{r}}{\bar{R}_p} + \ln \frac{\bar{R}_k}{\bar{R}} \right), \quad \bar{R}_p < \bar{r} \leq \bar{R}_k; \quad (22)$$

$$\tilde{h}_0(\bar{r}) = 1 + \frac{\bar{I}_k \bar{q}_\infty}{1 - \tilde{m}_0} \ln \frac{\bar{r}}{\bar{R}}, \quad \bar{R}_k < \bar{r} \leq \bar{R}, \quad (23)$$

где $\tilde{m}_0 = m_0 / (1 - m_s)$. Из уравнения (15) или системы (20)-(23) следует ключевое для фильтрационных расчетов уравнение

$$\frac{\bar{b}_f \bar{I}_k^2 \bar{q}_\infty^2}{(1 - \tilde{m}_0)^2} \left(1 - \frac{1}{\bar{R}_f} \right) + \frac{\bar{I}_k \bar{q}_\infty}{1 - \tilde{m}_0} \left(\bar{a}_f \ln \bar{R}_f + \frac{1}{\bar{k}_p} \ln \frac{\bar{R}_p}{\bar{R}_f} + \frac{1}{\bar{k}_e} \ln \frac{\bar{R}_k}{\bar{R}_p} + \ln \frac{\bar{R}}{\bar{R}_k} \right) = 1. \quad (24)$$

Здесь радиусы \bar{R}_k , \bar{R}_p в соответствии с (16), (18) выражаются через расход \bar{q}_∞ следующим образом

$$\bar{R}_k = \frac{\bar{q}_\infty}{1 - \tilde{m}_0}, \quad (25)$$

$$\bar{R}_p = \sqrt{\frac{\tilde{m}_0 \bar{q}_\infty^2 + \tilde{m}_p (1 - \tilde{m}_0)^2 \bar{R}_f^2}{(\tilde{m}_0 + \tilde{m}_p)(1 - \tilde{m}_0)^2}}, \quad (26)$$

где $\tilde{m}_p = m_p / (1 - m_s)$.

Эталоном для последующих оценок значимости внешней суффозии при действии трубофильтра будут служить значения его относительного расхода в недеформированном грунте, вычисленные по формуле

$$\bar{q}_{\infty 0} = \frac{\bar{R}_f (1 - \tilde{m}_0)}{2 \bar{b}_f \bar{I}_k (\bar{R}_f - 1)} \left[\sqrt{\left(\bar{a}_f^2 \ln^2 \bar{R}_f + \ln \frac{\bar{R}}{\bar{R}_f} \right)^2 + 4 \bar{b}_f \left(1 - \frac{1}{\bar{R}_f} \right)} - \bar{a}_f \ln \bar{R}_f - \ln \frac{\bar{R}}{\bar{R}_f} \right]. \quad (27)$$

Формула (27) выведена путем несложных преобразований (19), причем для корректности сопоставительного анализа используются при нормировании входящих в (19) величин те же масштабы, включая критическую скорость и градиент. Наконец, из (27) вытекает хорошо известная формула для обычной трубчатой дрены ($R_f = R_d$)

$$\bar{q}_{\infty 0} = \frac{1 - \tilde{m}_0}{\bar{I}_k \ln \bar{R}}. \quad (28)$$

Предметом обстоятельного количественного анализа стали такие физико-механические аспекты эксплуатации трубофильтров как нелинейность фильтрации, прослой кольматажа, механический состав

грунта. В центре внимания был относительный дренажный расход \bar{q}_∞ , который является ключевой фильтрационной характеристикой в рассматриваемых условиях. Его изменение в многочисленных примерах увязывалось с изменением важнейших, также относительных модельных параметров $(\tilde{m}_p, \bar{D}, \bar{a}_f)$. Последние последовательно варьировались непрерывно и дискретно в широких пределах, что позволило охватить и типичные, и не вполне характерные ситуации, складывающиеся при работе трубофильтров в несвязных грунтах. Значения других параметров были зафиксированы и таким образом информационную базу составили: $\bar{I}_k = 0.005$, $\bar{R} = 500$, $\tilde{m}_0 = 0.15$ или 0.06 , $\tilde{\tilde{m}}_0 = m_0/m_s = 0.1$ или 0.04 . Значения расхода после завершения деформаций \bar{q}_∞ регулярно сопоставлялись с его значениями до начала деформаций $\bar{q}_{\infty 0}$. Первые рассчитывались подбором из уравнения (24) с учетом (25), (26); вторые, эталонные – по формуле (27). На первом этапе расчетов для большей наглядности значения \bar{q}_∞ и $\bar{q}_{\infty 0}$ соотносились, так что множество полученных данных было представлено в форме зависимостей расходного параметра $g_q = q_\infty/q_{\infty 0} = \bar{q}_\infty/\bar{q}_{\infty 0}$ от параметров \tilde{m}_p (рис.1) и \bar{D} (рис.2). Тем самым значимость последствий внешней суффозии для действия трубофильтра сразу давалась в процентном выражении. В первой серии примеров исходный механический состав грунта характеризовался такими значениями: $\tilde{m}_0 = 0.06$, $\tilde{\tilde{m}}_0 = 0.04$, что отвечает $m_0 = 0.024$, $m_s = 0.6$ и, следовательно, $n_0 = 0.376$. Благодаря малости m_0 стало возможным в примерах увеличивать концентрацию суффозионных частиц многократно (допускалось десятикратное). Это согласуется с имеющимися в литературе по фильтрованию малоцентрированных суспензий через зернистые среды данными относительно грязеемкости, которая в среднем составляет половину исходного порового пространства, а в отдельных случаях и его 60-70 %. Примерно такое же увеличение объемной концентрации неструктурных частиц наблюдалось в опытах по увлажнению модельных суффозионных грунтов. Вычисления \bar{q}_∞ проведены при четырех значениях \bar{D} с помощью уравнения (24). Расход $\bar{q}_{\infty 0}$ здесь имеет единственное значение 27.355, поскольку \bar{I}_k , \bar{R} вообще фиксированные, а влияние стенки во внимание не принималось. Из рис.1 очевидно, что значительное накопление суффозионного вещества вблизи трубофильтра ведет к соразмерному снижению его расхода (до 4-8 раз). Взаимная же близость кривых 1-4 свидетельствует о меньшей значимости отношения диаметров \bar{D} для притока к трубофильтру, чем \tilde{m}_p . Этот вывод подтверждает и рис.2, на котором изображены графики зависимости g_q от \bar{D} при трех значениях \tilde{m}_p .

В данной серии примеров принято существенно большее исходное содержание суффозионных частиц ($m_0 = 0.06$), что при том же $m_s = 0.6$ дает для $\tilde{m}_0, \tilde{\tilde{m}}_0$ значения 0.15, 0.1. Естественно, что кратность увеличения объема суффозионного вещества из-за ограниченности предельного насыщения грунта здесь намного меньше. Тем не менее, и в этой серии примеров отмечалось значительное снижение дренажного расхода, в частности, при $\bar{D} = 10$ и четырехкратном увеличении количества упомянутого вещества в аккумулирующей зоне величина \bar{q}_∞ уменьшалась почти в 8 раз.

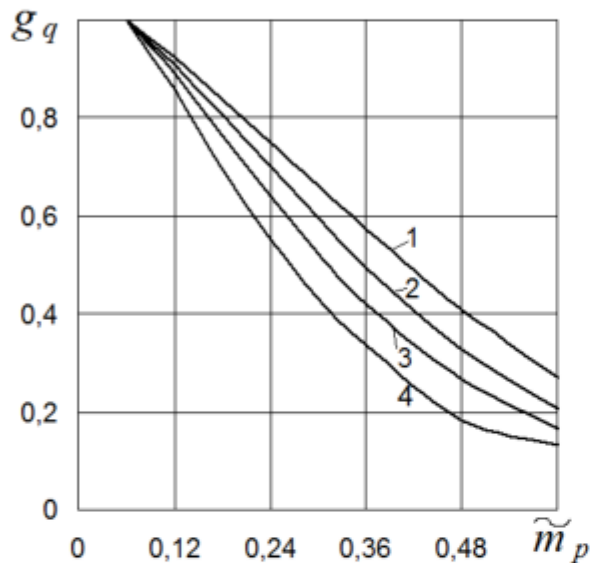


Рис.1. Зависимость $g_q(\tilde{m}_p)$:

- 1 – $\bar{D} = 3$, 2 – $\bar{D} = 5$, 3 – $\bar{D} = 7$,
4 – $\bar{D} = 10$

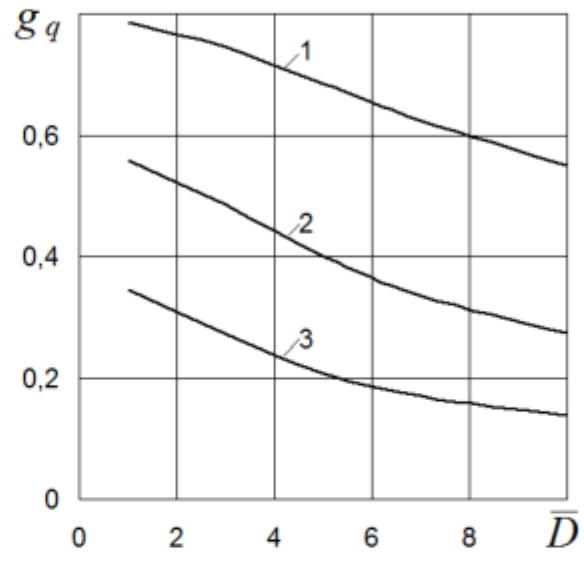


Рис.2. Зависимость $g_q(\bar{D})$:

- 1 – $\tilde{m}_p = 0.3$, 2 – $\tilde{m}_p = 0.45$,
3 – $\tilde{m}_p = 0.6$

В последующих расчетах дополнительно принималось во внимание противодействие течению со стороны стенки. Поэтому основной коэффициент в законе (1) теперь имел или только некоторые целочисленные, или любые значения из интервала [1, 20]. А поскольку для облегчения анализа фильтрация в стенке тоже считалась линейной ($b_f = 0$), то ее относительный коэффициент фильтрации \bar{k}_f должен равняться обратной величине \bar{a}_f и, следовательно, меняться в примерах от 1 до 0.05. Кроме того, полагалось $\tilde{m}_0 = 0.15$, $\tilde{\tilde{m}}_0 = 0.1$ и сначала $\bar{D} = 5$. Соответствующие этим данным кривые снижения расхода \bar{q}_∞ с увеличением степени насыщения частицами аккумулирующей зоны изображены на рис.3. Видно, что более-менее серьезное влияние стенка способна оказывать на приток жидкости только при незначительном накоплении неструктурного вещества около нее, а при большом оно нивелируется. И в заключение,

рассматривалось действие гипотетического фильтра с плавно и существенно ухудшающейся проницаемостью. Степень деформации грунта характеризовалась приведенными значениями $\tilde{m}_p = 0.45$, $\tilde{\tilde{m}}_p = 0.3$, что при базовых $\tilde{m}_0 = 0.15$, $\tilde{\tilde{m}}_0 = 0.1$ означает увеличение количества суффозионных частиц в вышеупомянутой зоне втрое. Кривые зависимости $\bar{q}_\infty(\bar{a}_f)$ представлены на рис.4 и указывают на заметное сокращение эталонного расхода по мере увеличения \bar{a}_f . Вместе с тем, принятые показатели перераспределения суффозионного вещества обуславливают значительное уменьшение расчетного расхода. При этом его связь с параметрами \bar{a}_f, \bar{D} , как следует из малого уклона и близости друг к другу кривых 2-5 на рис.4, выражена слабо.

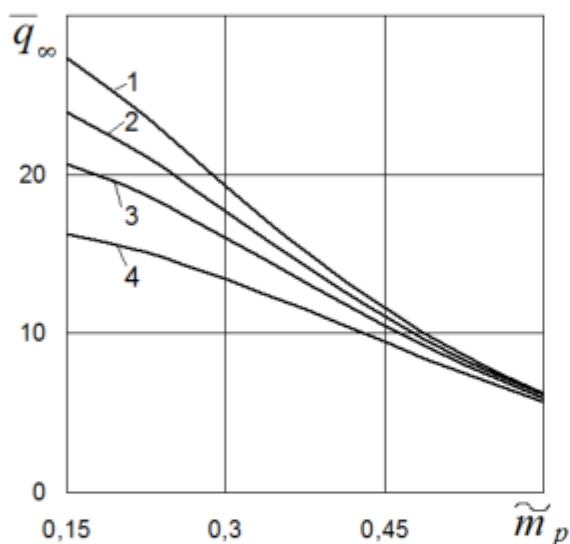


Рис.3. Зависимость $\bar{q}_\infty(\tilde{m}_p)$:

- 1 – $\bar{a}_f = 1$, 2 – $\bar{a}_f = 5$,
3 – $\bar{a}_f = 10$, 4 – $\bar{a}_f = 20$

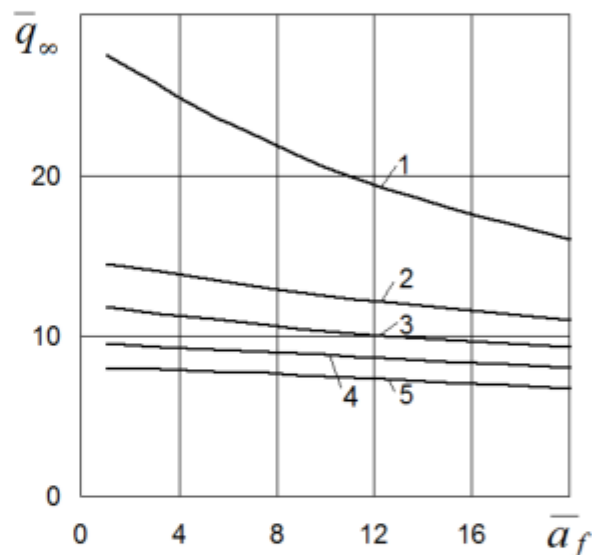


Рис.4. Зависимость $\bar{q}_\infty(\bar{a}_f)$, $\bar{q}_{\infty 0}(\bar{a}_f)$:

- 1 – $\bar{q}_{\infty 0}$, 2-5 – \bar{q}_∞ ; 2 – $\bar{D} = 3$,
3 – $\bar{D} = 5$, 4 – $\bar{D} = 7$, 5 – $\bar{D} = 10$

Итак, применение в гидротехнической, мелиоративной практике дренажей с пористыми стенками, которые имеют высокую проницаемость для жидкости и не пропускают частицы грунта в силу малости своих пор, а возможно, и сводообразования на входе в них, чревато, особенно в экстремальных условиях, значительными дополнительными потерями напора. Поэтому рациональный выбор трубофильтра должен осуществляться с учетом его проницаемости по отношению к жидкой и твердой фазам грунта и только после детального изучения физико-механических свойств последнего.

Заключение

Трубчатые дрены со стенками из пористых материалов (бетон, полимеры) применяются в различных областях водного хозяйства. Трубофильтры способны обеспечивать стабильное дренирование суффозионных грунтов и имеют значительный срок службы. При развитии внешней суффозии возможны два пути трансформации физико-механического состояния грунта, которые с гидравлической точки зрения имеют принципиальные различия. В зависимости от соотношения между размерами пор и неструктурных частиц фильтрационные условия в областях деформаций и движения в целом могут за счет суффозии или улучшаться, или ухудшаться. В первом случае указанные частицы выносятся с жидкостью в дренаж, и в связи с этим возникает опасность заиления ее и отводящих сетей. Во втором случае стенка дрены не пропускает мобилизованные частицы грунта и вследствие этого они скапливаются в непосредственной близости от нее, образуя менее проницаемый прослой. И хотя благодаря такому перераспределению суффозионных частиц в прилегающей к нему зоне проницаемость среды заметно увеличивается, но в итоге превалирует именно эффект «уплотнения» твердой фазы в упомянутом прослое. Формирование слабопроницаемого прослоя описывается сложной нелинейной математической моделью с неизвестными подвижными границами, состоящей из деформационного и фильтрационного блоков. Естественно, что ее решение может быть получено только численными методами. Тем не менее, для практических расчетов предлагается эффективное приближенное решение соответствующей стационарной задачи. Такое решение удалось построить с использованием гипотезы о равномерном распределении задержанных частиц в прослое. И здесь особое значение приобретает нововведенный параметр, характеризующий максимальную емкость грунта по отношению к таким частицам. Он должен устанавливаться при проведении специальных опытов. С этим параметром тесно связан коэффициент фильтрации, который наряду с толщиной прослоя, осуществляет основной контроль фильтрационного процесса.

Список литературы

1. *Абрамов С.К., Дегтярев Б.М., Корниенко И.В.* Горизонтальные дренажи с трубофильтрами из пористого бетона. – М.: Стройиздат, 1976. – 81 с.
2. *Козаков В.С., Нетреба Н.Н., Мясков А.В.* Дренажные трубофильтры с водоприемно-соединительными устройствами // Гидротехника и мелиорация. – 1976. – № 4. – С.68-72.

3. *Осипов А.Д., Ронжин И.С., Панфилов В.С. и др.* Дренажи и фильтры из пористого бетона // Гидротехника и гидроэнергетика. – М.: Энергия – 1972. – № 27. – 110 с.
4. *Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г., Фридрихсон В.Л.* Трубчатый дренаж из полимерных материалов // Гидротехника и мелиорация. – 1982. – № 4. – С.48-50.
5. *Шкиннис Ц.Н.* Гидрологическое действие дренажа. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
6. *Абрамов С.К., Коринченко И.В.* Оценка фильтрационных параметров крупнопористых бетонов как материалов дренажных конструкций. – В кн.: Фильтрация воды в пористых средах. Докл. III Международного симпозиума. – Ч.1. – К.: Наук.думка, 1978. – С.5-14.
7. *Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.* Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия. Ленинградское отделение, 1979. – 176 с.
8. *Ergun S.* Fluid flow through packed columns // Chem. Eng. Prog. – 1952. – 48. – P.9-94.
9. *Mustafa S., Rafindadi M.A.* Nonlinear steady state seepage into drains // J. of Irrig. and Drain. Engrg., ASCE. – 1989. – 115, № 3. – P.358-376.
10. *Дмитриев Д.А.* К вопросу эффективности и надежности работы осушительно-увлажнительных дренажных систем // Гидравлика и гидротехника. – 1999. – Вып.60. – С.81-86.
11. *Кононов И.В., Насиковский В.П., Шапран В.Я.* Исследования и рекомендации по защите пористых трубофильтров для горизонтального дренажа в связных грунтах // Мелиорация и водное хозяйство. – 1977. – Вып.40. – С.33-42.
12. *Мясков А.В., Гурвич А.И., Плавник Ю.М. и др.* Исследование водопримной способности бестраншейного дренажа с фильтрующими элементами и влияние механического кольматажа на качество и надежность осушительной регулирующей сети. – В кн.: Вопросы проектирования бестраншейного дренажа. – Л.: Сев НИИГиМ, 1982. – С.3-27.
13. *Хлалук М.М.* Математичне моделювання взаємовпливових процесів фільтрації і механічної суфозії // Вісник УДАВГ. – Рівне, 1997. – Вип.1, ч.2. Гідротехнічне будівництво. – С.66-69.
14. *Грабовский П.А., Ларкина Г.М., Прогульный В.И.* Промывка водоочистных фильтров. Дренаж, отвод промывной воды – Одесса: Оптимум, 2012. – 240 с.
15. *Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Шержуков Б.С.* Массоперенос в водонасыщенных горных породах. Итоги науки и техники. Серия: Гидрогеология, инженерная геология. Т.11. – Москва, 1989. – 143 с.
16. *Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян В.С. и др.* Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. – М.: Недра, 1977. – 271 с.

17. *Тугай А.М., Олійник О.Я, Тугай Я.А.* Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 240 с.
18. *Saiers J.E., Hornberger G.M., Liang L.* First- and second-order kinetics approaches for modeling the transport of colloidal particles in porous media // *Water Resour. Res.* – 1994. – 30, № 9. – P.2499-2506.
19. *Поляков В.Л.* Коэффициент фильтрации несвязных грунтов при фильтрационных деформациях // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки.* – К.: КНУБА, 2012. – Вип.20. – С.96-104.
20. *Поляков В.Л.* К расчету коэффициента фильтрации суффозионных грунтов // *Доп.НАН України.* – 2012. - № 8. – С.54-59.
21. *Иващенко А.П.* Исследования одномерного фильтрационного потока в средах, деформируемых под действием градиентов напора // *Гидравлика и гидротехника.* – 1999. – Вып.60. – С.86-89.