

7.Тугай А.М. Вибір і визначення вихідних параметрів при розрахунках гідравлічних опорів недосконалих свердловин // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.27. – К.: Техніка, 2001. – С.158-163.

8.Тугай А.М. Методика розрахунку фільтраційних опорів свердловин // Водне господарство України. – 2001. – №3-4. – С.27-31.

9.Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления / Н.Г.Пивовар, Н.Г.Бугай, В.Л.Фридрихсон, А.И.Кривоног, В.В.Кривоног. – К.: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 332 с.

10.Колотило А.М., Копелевич І.Л., Корінко І.В., Епоян С.М., Колотило М.М., Ярошенко Ю.В. Бурові роботи при водопостачанні з підземних джерел. – Харків: Вид. група «РА-Каравела», 2002. – 108 с.

11.Тугай А.М., Орлов В.О., Шадура В.О. Буріння свердловин для водопостачання. – Рівне: РДТУ, 2000. – 140 с.

Получено 21.12.2009

УДК 532.546 : 626.82

В.Л.ПОЛЯКОВ, д-р техн. наук

Институт гидромеханики НАН Украины, к.Киев

В.В.ЖЕЛИЗКО

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

К РАСЧЕТУ УСТАНОВИВШЕЙСЯ НАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ К ДРЕНАЖАМ В НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТАХ

Получены формулы для расчета аналогов фильтрационного сопротивления, обусловленных переориентацией частиц скелета несвязного грунта под влиянием трубчатого дренажа. Выполнена оценка значимости указанного эффекта для действия самоизливающейся совершенной скважины.

Отримано формули для розрахунку аналогів фільтраційного опору, обумовлених переорієнтацією часток кістяка незв'язного ґрунту під впливом трубчастого дренажу. Виконано оцінку значимості зазначеного ефекту для дії досконалої свердловини, що самовиливається

Formulae have been obtained for calculating filtration resistances caused by non-cohesive soil particles re-orientation due to tube drain operation. Estimation has been performed of the deformation effect importance for well action at constant head.

Ключевые слова: напорная фильтрация, дренаж, фильтрационные деформации.

В обычных условиях при малой интенсивности фильтрационных процессов порождаемая ими гидродинамическая сила не способна привести частицы несвязных грунтов в движение. Устройство в таких грунтах дренажей, как правило, существенно изменяет водно-физическую картину. С одной стороны, дренажи вносят серьезное возмущение в природный фильтрационный режим, дают возможность эффективно его регулировать, а с другой – они часто инициируют фильтрационные деформации. Резко возрастающая вблизи дрен ско-

рость фильтрации и, как следствие, фильтрационная сила часто обуславливает мобилизацию структурных и неструктурных частиц грунтов. Мелкие, суффозионные частицы транспортируются жидкостью к границе области движения (внешняя суффозия) или вглубь грунта (внутренняя суффозия) [1, 2]. Крупные частицы, образующие скелет, совершают ограниченное вращательное движение, ориентируясь при этом вдоль течения, тем самым уменьшается сопротивление, оказываемое жидкой фазе со стороны твердой, и растет проницаемость грунта. Второй тип деформаций в отличие от первого (механической суффозии) начал углубленно изучаться экспериментальными методами сравнительно недавно в НУВГП (г.Ровно) [3]. В результате было установлено, что коэффициент фильтрации k тесно связан с градиентом напора I . Опираясь на опытные данные для зависимости $k(I)$, была предложена кусочно-линейная аппроксимация [4]

$$k = \begin{cases} k_u & \text{при } I \leq I_k \\ a + bI & \text{при } I_k < I \leq I_u \\ k_0 & \text{при } I \geq I_u \end{cases} \quad (1)$$

В дальнейшем был сформулирован и строго решен целый ряд задач установившейся фильтрации (плоской, осесимметричной, радиальной) на фоне различных дренажей [5-7]. Ниже будет рассмотрена в качестве типичного примера задача напорной фильтрации к дрене. Ее точное решение послужило базой для определения специального фильтрационного сопротивления, характеризующего эффект деформаций второго типа. Указанный параметр с помощью известного метода фильтрационных сопротивлений позволяет просто учитывать переориентацию структурных частиц в расчетах дренажей, что будет показано дальше применительно к самоизливающимся вертикальным дренажам.

Вследствие принятия для зависимости $k(I)$ кусочно-линейной формы (1) область движения будет состоять из 2-3 характерных зон. В зоне полной деформации ($R_u > r \geq R_d$, R_d – радиус дрены) коэффициент фильтрации максимальный, а градиент напора превышает предельный I_u ; в зоне частичной деформации коэффициент k уменьшается от k_u до k_0 по мере снижения I от I_u до I_k ; в третьей зоне грунт сохраняет исходное состояние. Реже первая зона отсутствует, так что имеет место только неполное упорядочение его структуры. При наличии всех трех отмеченных зон математическая задача осесимметричной установившейся напорной фильтрации, прежде всего, содержит систему уравнений фильтрации

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dh_j}{dx} \right) = 0, \quad j = u, 0 \quad \text{при} \quad I > I_u \quad \text{и} \quad I < I_k; \quad (2)$$

$$\frac{d}{dr} \left[rk_l \frac{dh_l}{dx} \right] = 0, \quad I_u \geq I \geq I_k. \quad (3)$$

На внутренних границах (между первой и второй, второй и третьей зонами) задаются условия сопряжения напоров и расходов:

$$r = R_u, \quad h_u = h_l; \quad \frac{dh_u}{dr} = \frac{dh_l}{dr}; \quad (4)$$

$$r = R_k, \quad h_l = h_0; \quad \frac{dh_l}{dr} = \frac{dh_0}{dr}. \quad (5)$$

Для определения заранее неизвестного положения этих границ используются дополнительные условия

$$r = R_u, \quad \frac{dh_u}{dr} = I_u; \quad r = R_k, \quad \frac{dh_0}{dr} = I_0. \quad (6)$$

На внешних границах области движения (поверхность дрены, контур питания радиусом R) принимались различные комбинации условий первого и второго родов. Но поскольку выбор таких условий не влиял на вид выражения для искомого параметра – фильтрационно-сопротивления Φ_f , характеризующего эффект деформаций при работе трубчатого дренажа, то имеет смысл ограничиться парой условий

$$r = R_d, \quad 2\pi R_d k_u \frac{dh_u}{dr} = q; \quad r = R, \quad h_0 = H_R. \quad (7)$$

Другие варианты условий рассмотрены, например, в [6, 7]. Промежуточные выкладки опускаются. В итоге после громоздких преобразований получены в первую очередь выражения для распределения относительного напора в области фильтрации, представленные в безразмерной форме:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_u = & -\frac{1}{k_u} \ln(\bar{k}_u \bar{I}_u \bar{r}) + \ln(\bar{I}_k \bar{R}) - \frac{\bar{a}}{2b} \left(\frac{1}{\bar{I}_k} - \frac{1}{\bar{k}_u \bar{I}_u} \right) + \frac{1}{2b} \left(\sqrt{\frac{\bar{a}^2}{\bar{I}_k^2} + \frac{4\bar{b}}{\bar{I}_k}} - \right. \\ & \left. - \sqrt{\frac{\bar{a}^2}{\bar{k}_u^2 \bar{I}_u^2} + \frac{4\bar{b}}{\bar{k}_u \bar{I}_u}} \right) + \frac{2}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}} \bar{k}_u \bar{I}_u}{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}} \bar{I}_k} + \frac{1}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{I}_k}{\bar{k}_u \bar{I}_u}; \\ \tilde{h}_l = & -\frac{\bar{a}}{2b} \left(\bar{r} - \frac{1}{\bar{I}_k} \right) + \frac{1}{2b} \left(\sqrt{\bar{a}^2 \bar{r}^2 + 4\bar{b} \bar{r}} - \sqrt{\frac{\bar{a}^2}{\bar{I}_k^2} + \frac{4\bar{b}}{\bar{I}_k}} \right) + \end{aligned} \quad (8)$$

$$+ \frac{2}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{a}\sqrt{\bar{r}} + \sqrt{\bar{a}^2\bar{r} + 4\bar{b}}}{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}} \bar{I}_k} + \frac{1}{\bar{a}} \ln \bar{I}_k - \ln(\bar{I}_k \bar{R}) ; \quad (9)$$

$$\tilde{h}_0 = -\ln \frac{\bar{r}}{\bar{a}} . \quad (10)$$

$$\text{Здесь } \tilde{h}_j = 2\pi k_0 \frac{H_R - h_j}{q}, \quad \bar{k}_u = \frac{k_u}{k_0}, \quad \bar{I}_{u,k} = \frac{\bar{I}_{u,k}}{I_0}, \quad I_0 = \frac{q}{2\pi k_0 R_d},$$

$$\bar{r} = \frac{r}{R_d}, \quad \bar{R} = \frac{R}{R_d}, \quad \bar{a} = 1 - \bar{b} \bar{I}_k, \quad \bar{b} = \frac{\bar{k}_u - 1}{\bar{I}_u - \bar{I}_k}.$$

Относительный коэффициент фильтрации во второй зоне будет

$$\bar{k}_l = \frac{\bar{a}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{2\bar{b}}\right)^2 + \frac{\bar{b}}{\bar{r}}} . \quad (11)$$

Мерой фильтрационных деформаций в расчетах дренажей может служить аналог обычных фильтрационных сопротивлений [8], который вводится на основе обобщенного представления их расхода, а именно,

$$q = 2\pi k_0 \frac{\Delta h}{\Phi_0 + \Phi_f}, \quad (12)$$

где Φ_0 – сопротивление недеформированной среды в благоприятных для работы условиях, которое, вообще говоря, может включать и другие компоненты, учитывающие разные виды несовершенства дрен. С использованием (8)-(10) исходя из (12) было выведено следующее выражение для искомого Φ_f :

$$\Phi_f = \frac{1}{k_u} \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{k}_u \bar{I}_u} - \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k} + Y_1(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k), \quad (13)$$

$$\text{где } Y_1 = \int_{\bar{k}_u}^{\bar{R}_k} \frac{dr}{r \bar{k}_l(\bar{r})} = \frac{\bar{a}}{2\bar{b}} \left(\frac{1}{\bar{k}_u \bar{I}_u} \right) + \frac{1}{2\bar{b}} \left(\sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{\bar{I}_k}\right)^2 + \frac{4\bar{b}}{\bar{I}_k}} - \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{\bar{k}_u \bar{I}_u}\right)^2 + \frac{4\bar{b}}{\bar{k}_u \bar{I}_u}} \right) + \frac{2}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}} \bar{I}_k}{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}} \bar{k}_u \bar{I}_u} + \frac{1}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{k}_u \bar{I}_u}{\bar{I}_k}.$$

Формула (13) пригодна для вычислений только, если максимальный за период эксплуатации дрены расход \bar{q}_m удовлетворяет условию

$$\bar{q}_m > \bar{k}_u \bar{I}_u . \quad (14)$$

При выполнении же условия

$$\bar{k}_u \bar{I}_u > \bar{q}_m > \bar{I}_k \quad (15)$$

происходят частичные деформации. Тогда Φ_f станет

$$\Phi_f = -\ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k} + Y_2(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{q}_m), \quad (16)$$

$$\text{где } Y_2 = \frac{\bar{a}}{2\bar{b}} \left(\frac{1}{\bar{q}_m} - \frac{1}{\bar{I}_k} \right) + \frac{1}{2\bar{b}} \left(\sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{\bar{I}_k} \right)^2 + \frac{4\bar{b}}{\bar{I}_k}} - \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{\bar{q}_m} \right)^2 + \frac{4\bar{b}}{\bar{q}_m}} \right) + \\ + \frac{2}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}}}{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}}} \frac{\bar{I}_k}{\bar{q}_m} + \frac{1}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k}.$$

Применение приведенных выше формул для Φ_f позволяет учитывать эффект фильтрационных деформаций при научном обосновании трубчатого дренажа, опираясь на известные инженерные расчетные методы, причем без какой-либо их корректировки. Особенно эффективным подобный подход оказывается в случае неустановившегося притока к дренажу. В качестве его возможной и успешной практической реализации предлагается рассмотреть действие одиночной совершенной самоизливающейся скважины в несвязном несущем грунте. Тогда для условий напорной фильтрации соответствующая математическая задача относительно безразмерного снижения напора \bar{S} может быть сформулирована следующим образом:

$$\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{r}} \right) = \frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{t}}, \quad (17)$$

$$\bar{r} = 1, \quad \frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{S} - 1}{\Phi_f} = 0; \quad (18)$$

$$\bar{r} = \bar{R}_*(\bar{t}), \quad \bar{S} = 0, \quad \frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{r}} = 0; \quad (19)$$

$$\bar{t} = 0, \quad \bar{S} = 0, \quad \bar{R}_* = 1. \quad (20)$$

Здесь $\bar{S} = \frac{H^0 - h}{H^0 - H_d}$, H^0, H_d – напоры при $t = 0$ и на дрене;

$\bar{t} = \frac{k_0 m t}{\mu R_d^2}$, m – мощность водоносной толщи, μ – коэффициент уп-

ругой водоотдачи. Кроме того, \bar{R}_* обозначает радиус условной зоны влияния дрена, которая со временем расширяется. Для вычисления неизвестной закономерности $\bar{R}_*(\bar{t})$ задается второе из условий (19). Приближенное решение сложной в математическом отношении задачи (17)-(20) построено в параметрическом виде. В частности, относительное снижение напора в области фильтрации предлагается рассчитывать на базе системы уравнений

$$\bar{S}(\bar{r}, \bar{R}_*) = \frac{\bar{r} - \bar{R}_* - \bar{R}_* \ln \frac{\bar{r}}{\bar{R}_*}}{(1 + \Phi_f)(1 - \bar{R}_*) + \bar{R}_* \ln \bar{R}_*}, \quad (21)$$

$$\bar{t} = \frac{\bar{R}_*^2 - 1}{6} + \frac{1}{12} \int_1^{\bar{R}_*} \frac{\xi - 1 - \Phi_f}{(1 + \Phi_f)(1 - \xi) + \xi \ln \xi} d\xi. \quad (22)$$

Наконец, относительный расход в совершенную дрена в деформированном грунте составит

$$\bar{Q} = \frac{Q}{2\pi k_0(H^0 - H_d)} = - \left. \frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=1} = \frac{\bar{R}_* - 1}{(1 + \Phi_f)(1 - \bar{R}_*) + \bar{R}_* \ln \bar{R}_*}. \quad (23)$$

Строгое решение задачи (17)-(19) для $\Phi_f = 0$ представлено в работе [9] и на его базе для \bar{Q} при $\bar{t} \geq 10$ рекомендуется формула

$$\bar{Q} = 2 \left(\int_{1/(4\dots)}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \right)^{-1}. \quad (24)$$

С целью иллюстрации методики определения сопротивления Φ_f и оценки значимости деформаций второго типа при эксплуатации вертикального дренажа проведен на многочисленных примерах количественный анализ. Прежде всего, для облегчения практического применения указанной методики построены графики зависимости абсолютной величины $|\Phi_f|$ от глубины деформаций, характеризуемой относительным предельным коэффициентом \bar{k}_u . Данные ее вычислений при разных значениях \bar{q}_m по формуле (13) при выполнении условия (14) или по (16) при условии (15) представлены на рис.1. С увеличением \bar{k}_u и \bar{q}_m фактическое сопротивление может снизиться до -1 и более, что косвенно свидетельствует о важности деформационного эффекта для функционирования любых водорегулирующих устройств в несвязных

грунтах. Непосредственно же его значимость оценивалась на примере самоизливающейся скважины в неограниченном в плане напорном пласте. Предварительно выяснялась правомочность использования полученного выше приближенного решения. Для этого сравнивались кривые изменения относительного расхода дрены, рассчитанные по приближенной (23) и строгой (24) формулам. Как видно из рис. 2, на котором они приведены, первая обеспечивает приемлемую для практики точность и вполне может быть задействована, по крайней мере, для оценочных расчетов. В примерах для Φ_f принимались типичные значения 0 (контроль), -0.5 , -1 . В первую очередь определялось относительное понижение напора вдоль зоны влияния скважины при фиксированном времени $\bar{t} = 10^4$ (рис.3).

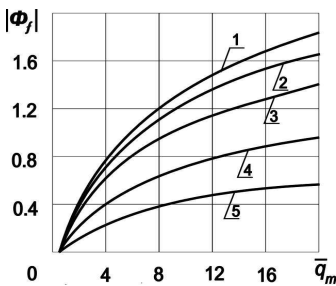


Рис.1 – Графики зависимости $|\Phi_f(q_m)|$:

1 – $\bar{k}_u = 3$; 2 – $\bar{k}_u = 2,5$; 3 – $\bar{k}_u = 2$;

4 – $\bar{k}_u = 1,5$; 5 – $\bar{k}_u = 1,25$.

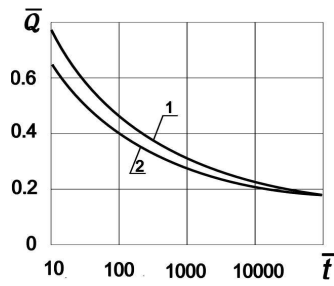


Рис.2 – Изменение относительного расхода дрены со временем:

1 – приб.; 2 – точн.

Относительный радиус данной зоны вычислялся по формуле (22) и оказалось, что он практически не зависит от Φ_f , составив примерно 245. Воздействие деформаций на фильтрационную картину выразилось в более быстром понижении кривых $\bar{S}(\bar{r})$ по мере удаления от дрены, но в целом оно было незначительным. Вместе с тем, изучаемое локальное упорядочение структуры грунту существенно отразилось на дренажном расходе, что демонстрируется рис.4. Здесь показаны кривые изменения относительного приращения дренажного расхода G со временем. Нововведенный параметр G имеет вид:

$$G = \frac{Q - Q_0}{Q_0},$$

где Q_0 – контрольное (при $\Phi_f=0$) значение расхода. При выбранных значениях Φ_f и длительности расчетного периода G изменялся в пределах нескольких десятых, достигая максимального 0,6.

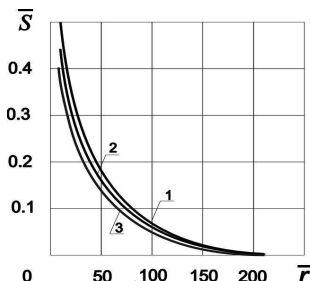


Рис.3 – Профили понижения напора:

1 – $\Phi_f=0$; 2 – $\Phi_f=0,5$; 3 – $\Phi_f=-1$.

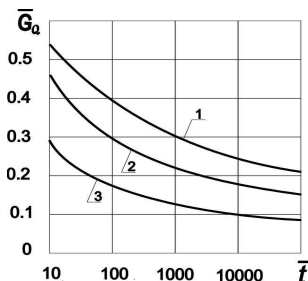


Рис.4 – Графики зависимости :

1 – $\Phi_f=1,5$; 2 – $\Phi_f=-1$; 3 – $\Phi_f=-0,5$.

Таким образом, переориентация частиц скелета в состоянии серьезно повлиять на действие вертикальных скважин.

1.Кондратьев В.Н. Фильтрация и механическая суффозия в несвязных грунтах. – Симферополь: Крымиздат, 1958. – 76 с.

2.Мурашко А.И. Сельскохозяйственный дренаж в гумидной зоне. – М.: Колос, 1982. – 272 с.

3.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: РГТУ, 2002. – 145 с.

4.Поляков В.Л. Фильтрационные деформации несвязных несуффозионных грунтов при установившейся одномерной безнапорной фильтрации // Доповіді НАН України. – 2009. – №4. – С.51-57.

5.Желизко В.В. Установившаяся плоская напорная фильтрация в несвязных несуффозионных грунтах с локально упорядоченной структурой // Науковий вісник будівництва. Вип.54. – Харків: ХДТУБА, 2009. – С.305-315.

6.Поляков В.Л., Желизко В.В. Безнапорная осесимметричная фильтрация к совершенной дрене в несвязном грунте с упорядоченной структурой // Науковий вісник будівництва. Вип.49. – Харків: ХДТУБА, 2008. – С.153-163.

7.Поляков В.Л., Желизко В.В. Напорная фильтрация к совершенной дрене в несуффозионном грунте // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. Вип.11. – К.: КНУБА, 2008. – С.112-127.

8.Пивовар Н. Г., Бугай Н.Г., Фридрихсон В.Л., Кривоног А.И., Кривоног В.В. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления. – К.: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 332 с.

Получено 06.01.2010