УДК 532.546

Поляков В. Л., д.т.н., ведущий научный сотрудник, Желизко В. В., соискатель (Институт гидромеханики НАН Украины, Киев)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЛОКАЛЬНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Сформулирована и строго решена задача установившейся фильтрации жидкости к малому сферическому тоску в несвязном несуффозионном грунте. Для учета переориентации несферических частиц скелета введено и определено соответствующее фильтрационное «сопротивление». На типичных примерах показана значимость локального упорядочения структуры грунта для действия гончарного дренажа.

***Ключевые слова*: фильтрация, грунт, гончарный дренаж.**

Интенсификация фильтрационных процессов в несвязных грунтах нередко приводит к развитию особых деформаций, выражающихся в переориентации частиц скелета несферической формы вдоль течения жидкости (второй тип фильтрационных деформаций) [1, 2]. Как правило, упорядочение структуры грунта локализовано вблизи источников сильного возмущения фильтрационного режима. Такими чаще всего являются разнообразные дренажи. Оптимизация в фильтрационном отношении положения структурных частиц непосредственно обусловливает улучшение проницаемости пористой среды на наиболее ответственном участке фильтрационного потока. Поэтому влияние деформаций в дренируемых грунтах проявляется и на значительном удалении от дрен. Степень деформирования грунта зависит от многих факторов и ее удобно характеризовать соотношением между коэффициентами фильтрации до начала k_0 и после завершения его трансформации. Поэтому ключевую роль при моделировании притока грунтовых (подземных) вод к горизонтальным и вертикальным дренам играет зависимость коэффициента фильтрации k от градиента напора I, характеризующего гидродинамическое воздействие жидкой фазы пористой среды на неподвижную твердую. Логично предположить, что переориентировать некоторые частицы ввиду их более прочной фиксации можно лишь прикладывая очень большую фильтрационную силу. Отсюда следует целесообразность выбора для $k(I)$ аппроксимационного выражения, которое описывает асимптотическое стремление k к конечному предельному значению k_u (при $I \to \infty$). Ранее эмпирические данные по связи k с I приближались кусочно-линейной функцией [3, 4]. Итак, осушительное действие некоторых дренажей анализировалось на основе следующего выражения [5, 6]

$$k = \frac{k_u I + \alpha}{I + K_I}, \qquad (1)$$

K_I – эмпирическая константа, $\alpha = k_0 K_I - (k_u - k_0) I_k$, I_k – критический градиент. Пусть отведение воды осуществляется через зазоры между непроницаемыми трубками (гончарный дренаж) или фильтром водозаборной скважины из мощного пласта. Вблизи них создаются высокие градиенты, которые способствуют возникновению фильтрационных деформаций, а иногда и нарушению целостности среды с истечением структурного вещества в дрены, что в работе не рассматривается. Тогда установившийся приток жидкости к отдельному (малому) сферическому стоку радиусом R_d, моделирующему упомянутые зазоры и фильтр, описывается нелинейной математической моделью

$$\frac{d}{dr}\left(r^2 I \frac{k_u I + \alpha}{I + K_I} \right) = 0, \qquad R_d \le r \le R_k; \qquad (2)$$

$$\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dh_0}{dr} \right) = 0, \qquad R_k < r \le R; \qquad (3)$$

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

$$r = R_k, \quad h_I = h_0; \qquad \frac{dh_I}{dr} = \frac{dh_0}{dr} = I_k. \qquad (5)$$

Здесь h_I, h_0 – пьезометрические напоры в области деформаций ($R_d \le r \le R_k$) и надеформированном грунте; R, R_k – радиусы контура питания и границы между деформированным недеформированным грунтом; H_d, H_R – напоры на стоке и контуре питания. Постановка задачи (2) – (5) упрощается благодаря введению безразмерных переменных и параметров: $\widetilde{h}_{I,0} = \dfrac{h_{I,0} - H_d}{H_R - H_d}$, $\bar{r} = \dfrac{r}{R_d}$, $\overline{R} = \dfrac{R}{R_d}$, $\overline{R}_k = \dfrac{R_k}{R_d}$, $\bar{I} = \dfrac{I}{I_0}$, $\bar{I}_k = \dfrac{I_k}{I_0}$, $\bar{\alpha} = \dfrac{\alpha}{k_0 I_0}$, $\overline{K}_I = \dfrac{K_I}{I_0}$, $I_0 = \dfrac{H_R - H_d}{R_d}$. Тогда она трансформируется к виду

$$\frac{d}{d\bar{r}}\left(\bar{r}^2\bar{I}\,\frac{\bar{k}_u\bar{I}+\bar{\alpha}}{\bar{I}+\bar{K}_I}\right)=0, \qquad 1\le\bar{r}\le\bar{R}_k; \tag{6}$$

$$\frac{d}{d\bar{r}}\left(\bar{r}^2\,\frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{r}}\right)=0, \qquad \bar{R}_k<\bar{r}\le\bar{R}; \tag{7}$$

$$r=1, \quad \tilde{h}_I=0; \qquad \bar{r}=\bar{R}, \quad \tilde{h}_0=1; \tag{8}$$

$$\bar{r}=\bar{R}_k, \quad \tilde{h}_I=\tilde{h}_0; \qquad \frac{d\tilde{h}_I}{d\bar{r}}=\frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{r}}=\bar{I}_k. \tag{9}$$

Интегрирование уравнения (6) дает квадратное уравнение относительно $\bar{I}$

$$\bar{k}_u\bar{r}^2\bar{I}^2+\left(\overline{\alpha r}^2-\bar{q}\right)\bar{I}-\bar{q}\bar{K}_I=0, \tag{10}$$

где $\bar{q}=q/\left(4\pi k_0I_0R_d^2\right)$ – относительная и пока неизвестная интенсивность стока (расход водоприемного элемента). Из (10) следует задача относительно $\tilde{h}_I$:

$$\frac{d\tilde{h}_I}{d\bar{r}}=\frac{1}{2\bar{k}_u\bar{r}^2}\left[\bar{q}-\overline{\alpha r}^2+\sqrt{\left(\bar{q}-\overline{\alpha r}^2\right)^2+4\bar{k}_u\bar{K}_I\overline{qr}^2}\right], \tag{11}$$

и первое условие (8). Ее решение позволяет получить для напора $\tilde{h}_I$, как функции от $\bar{r}$, $\bar{q}$, следующее выражение

$$\tilde{h}_I(\bar{r};\bar{q})=\frac{1}{2\bar{k}_u}\left[\bar{q}\left(1-\frac{1}{\bar{r}}\right)-\bar{\alpha}(\bar{r}-1)+E(\bar{r};\bar{q})\right], \tag{12}$$

где $E(\bar{r};\bar{q})=\int\limits_1^{\bar{r}}\frac{\sqrt{\left(\bar{q}-\bar{\alpha}\xi^2\right)^2+4\bar{k}_u\bar{K}_I\bar{q}\xi^2}}{\xi^2}d\xi.$

В результате двойного интегрирования уравнения (7) с учетом вторых условий (8) и (9) найдено

$$\tilde{h}_0(\bar{r};\bar{q})=1-\bar{I}_k\bar{R}_k^2\left(\frac{1}{\bar{r}}-\frac{1}{\bar{R}}\right). \tag{13}$$

Формула для расчета радиуса $\bar{R}_k$ вытекает из уравнения (11) и второго условия (9) и будет

$$\bar{R}_k(\bar{q})=\sqrt{\frac{\bar{q}}{\bar{I}_k}}. \tag{14}$$

Для определения расхода $\overline{q}$, исходя из равенства напоров при $\overline{r}=\overline{R}_k$ (9) с учетом (14), составляется уравнение

$$\overline{q}\left(1-\sqrt{\frac{\overline{I}_k}{\overline{q}}}\right)-\overline{\alpha}\left(\sqrt{\frac{\overline{q}}{\overline{I}_k}}-1\right)+2\overline{k}_u\sqrt{\overline{I}_k\overline{q}}-\frac{2\overline{k}_u\overline{q}}{\overline{R}}+E\left(\overline{R}_k\left(\overline{q}\right);\overline{q}\right)=2\overline{k}_u. \quad (15)$$

При найденном из (15) значении $\overline{q}$ изменение $\overline{k}$ в области деформаций описывается зависимостью

$$\overline{k}\left(\overline{r};\overline{q}\right)=\frac{2\overline{k}_u\overline{q}}{\overline{q}-\overline{\alpha}\overline{r}^2+\sqrt{\left(\overline{q}-\overline{\alpha}\overline{r}^2\right)^2+4\overline{k}_u\overline{K}_I\overline{q}\overline{r}^2}}. \quad (16)$$

Из (16) легко вычислить максимальное значение $\overline{k}$, положив $\overline{r}=1$.

В отсутствии деформаций относительная интенсивность стока составляет

$$\overline{q}_0=1-\frac{1}{\overline{R}} \quad (17)$$

и при $\overline{R}$ >>1 практически равна 1.

При работе керамического (гончарного) дренажа водоотведение обеспечивается системой равномерно расположенных зазоров. При расстоянии между ними l_d соседние области деформаций не пересекутся, если выполняется условие

$$\overline{l}_d=\frac{l}{R_d}\geq 2\sqrt{\frac{\overline{q}}{\overline{I}_k}}. \quad (18)$$

В инженерных расчетах дренирования несвязных грунтов деформации второго типа несложно учесть, опираясь на метод фильтрационных сопротивлений и базовое представление для интенсивности сферического стока в пористой среде

$$q=k_0\frac{H_R-H_d}{\Phi_0+\Phi_f}. \quad (19)$$

Здесь Φ_0 – фильтрационное сопротивление стока, обладающего идеальной водоприемной способностью, причем

$$\Phi_0=\frac{1}{4\pi}\left(\frac{1}{R_d}-\frac{1}{R}\right). \quad (20)$$

Слагаемое Φ_f в (19) трактуется как дополнительное фильтрационное сопротивление вследствие рассматриваемых деформаций. А поскольку они обусловливают усиление действия дренажа (стока), то Φ_f имеет отрицательный знак и в соответствии с (19), (20) выражается через $\bar{q}$ следующим образом

$$\Phi_f = \frac{1}{4\pi R_d}\left(\frac{1}{\bar{q}} - 1 + \frac{1}{\bar{R}}\right) \approx \frac{1}{4\pi R_d}\left(\frac{1}{\bar{q}} - 1\right). \quad (21)$$

Подходящее значение $\bar{q}$ вычисляется подбором из уравнения (15).

Для иллюстрации построенного решения, а также оценки значимости частичного упорядочения структуры несвязного несуффозионного грунта под влиянием малого водоприемного элемента рассчитан ряд примеров с типичными исходными данными. Предметом расчетов стали относительные профиль коэффициента фильтрации в области деформаций $\bar{k}(\bar{r})$, интенсивность стока $\bar{q}$ и приведенное фильтрационное «сопротивление» $4\pi R_d \Phi_f$. Контур питания отнесен на бесконечность, так что из расчетных формул выпадает $\bar{R}$. Варьировались в примерах: $\bar{k}_u$ непрерывно (от 1 до 2), $\bar{K}_I$ и $\bar{I}_k$ дискретно. Для выделения эффекта усиления приточности к стоку за счет локального улучшения проницаемости грунта введен специальный параметр

$$G_q = \frac{q - q_0}{q_0},$$

который показывает прирост искомой интенсивности в относительных единицах.

В первую очередь определялось изменение величины $\bar{q}$ по мере увеличения $\bar{k}_u$ при заданных $\bar{I}_k$ (0.001) и $\bar{K}_I$ $(-0.001,\ 0.001,\ 0.005)$. Соответствующие кривые зависимости $G_q(\bar{k}_u)$ приведены на рис. 1. Несмотря на предельно большие размеры области фильтрации, что минимизирует гидродинамическое воздействие жидкости на скелет пористой структуры, имеет место значительное увеличение интенсивности стока (почти в $\bar{k}_u$ раз).

Проницаемость грунта в пределах области деформаций, как видно из рис. 2, плавно возрастает с приближением к стоку. Однако, коэффициент фильтрации, рассчитанный по формуле (16) при $\bar{I}_k = \bar{K}_I = 0.001$, трех значениях $\bar{k}_u$ и соответствующих им значениям $\bar{q}$, не достигает предельной величины даже на стоке. Тем не менее максимальная проницаемость вблизи стока, где происходят особенно большие потери напора, предопределяет важность ограниченных деформаций грунта. Наконец, о возможном их серьезном значении для работы дренажа свидетельствуют результаты вычислений

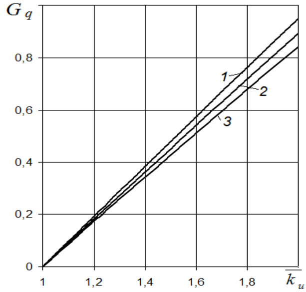

Рис. 1. Зависимость $G_q\left(\overline{k}_u\right)$: 1 – $\overline{K}_I$ = -0.001, 2 – $\overline{K}_I = 0.001$, 3 – $\overline{K}_I = 0.005$

безразмерного «сопротивления» $4\pi R_d \Phi_f$ по формуле (21) при разных $\overline{I}_k$, $\overline{K}_I = 0.001$ и их сравнения с величиной $4\pi R_d \Phi_0$. Последняя в примерах вследствие $R \to \infty$ равна 1. Кривые изменения абсолютной величины $\left|4\pi R_d \Phi_f\right|$ в принятом диапазоне значений $\overline{k}_u$ изображены на рис.3. Очевидно, что Φ_f может составлять значимую часть базового сопротивления Φ_0. Судя по рис. 1, 3, чувствительность фильтрационных характеристик по отношению к параметрам $\overline{I}_k$, $\overline{K}_I$ несущественная.

В целом следует констатировать, что переориентация несферических частиц скелета под влиянием гончарного дренажа, скважин способна заметно изменить фильтрационную картину в несвязном несуффозионном грунте, повысить эффективность водоотведения.

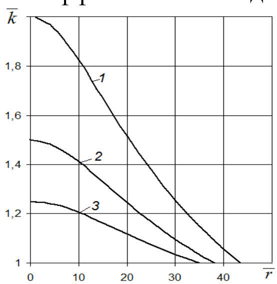

Рис. 2. Профили относительного коэффициента фильтрации в области

деформаций: 1 - $\overline{k}_u = 2$, 2 - $\overline{k}_u = 1.5$, 3 - $\overline{k}_u = 1.25$

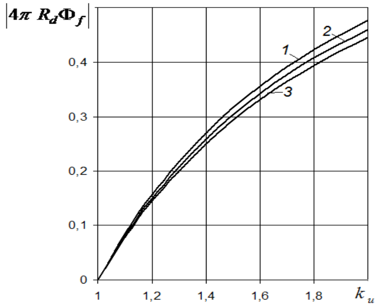

Рис. 3. Зависимость приведенного фильтрационного сопротивления от $\overline{k}_u$:

$$1 \text{ - } \overline{I}_k = 5\cdot10^{-4},\ 2 \text{ - } \overline{I}_k = 2.5\cdot10^{-3},\ 3 \text{ - } \overline{I}_k = 5\cdot10^{-3}$$

1. Дмитриев А. Ф. Деформационные процессы в несвязных грунтах в придренной зоне и их влияние на работу осушительно-увлажнительных систем / Дмитриев А. Ф., Хлапук Н. Н., Дмитриев Д. А. – Ровно : РГТУ, 2002. – 145 с. **2.** Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды / А. Э. Шейдеггер. – Москва : Гостоптехиздат, 1960. – 250 с. **3.** Поляков В. Л. Установившаяся напорная фильтрация к малому сферическому стоку в несвязном несуффозионном грунте / Поляков В. Л., Желизко В. В. // Прикладна гідромеханіка. – 2009. – 11(83). – С. 68-79. **4.** Хлапук М. М. Особливості закону Дарсі при моделюванні процесів фільтрації і механічної суфозії / Хлапук М. М., Бомба А. Я. // Вісник УДАВГ. – Рівне, 1997. – Вип. 1, ч. 2. Гідротехнічне будівництво. – С. 70-73. **5.** Поляков В. Л. О некоторых общих подходах к расчетам дренажа в несвязных грунтах / Поляков В. Л., Желизко В. В. // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – Вип.68. – С. 126-131. **6.** Поляков В. Л. Установившийся приток к дренажу в несвязном грунте с локально упорядоченной структурой / Поляков В. Л. // Доп.НАН України. – 2013. – № 2. – С. 57-64.

Рецензент: д.т.н., професор Бомба А. Я. (НУВГП)

Poliakov V. L., Doctor of Engineering, Senior Research Fellow, Zhelizko V. V., Applicant (Institute of Hydromechanics of NAS Ukraine, Kyiv)

ON LOCAL ORDERING NON-COHESION SOIL STRUCTURE BY A SINGLE SMALL SINK

A task of steady-state groundwater flow towards small spherical sink in cohesiveless non-piping soil has been stated and exactly solved. To take into account re-orientation of non-spherical structural particles, a hydraulic resistance has been determined. Significance of local ordering soil structure for ceramic drainage has been shown at typical examples.
***Keywords*: filtration, soil, pottery drainage.**

Поляков В. Л., д.т.н., провідний науковий співробітник,
Желізко В. В., пошуковець (Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ)

ТЕОРЕТИЧНІ І ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ЛОКАЛЬНОГО УПОРЯДКУВАННЯ СТРУКТУРИ НЕЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ

Сформульовано і строго розв’язано задачу усталеної фільтрації рідини до малого сферичного стоку в незв’язному несуфозійному ґрунті. Для врахування переорієнтації несферичних часток скелета запропоновано і визначено відповідний фільтраційний опір. На типових прикладах показано значущість локального впорядкування структури ґрунту для дії керамічного дренажу.
***Ключові слова*: фільтрація, ґрунт, гончарний дренаж.**
