

В. Л. Поляков

К оценке эффекта упорядочения структуры несвязного грунта при неустановившейся напорной плоской фильтрации

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

Найдено аналитическими методами и обосновано приближенное решение нестационарной задачи плоской напорной фильтрации на ее начальной стадии в однородном несвязном недеформированном грунте. На его основе получено выражение для профиля относительного коэффициента фильтрации грунта, частицы скелета которого в течение этой стадии успели переориентироваться вдоль потока. Выполнена оценка последствий указанного эффекта для установившегося фильтрационного режима при скоротечном и длительном характере развития деформаций на примере линейного совершенного водоприемника.

Интенсивное течение грунтовых и подземных вод в несвязных грунтах нередко порождает фильтрационные деформации специального типа, состоящие в переориентации несферических частиц скелета в направлении движения жидкости [1, 2]. Ранее аналитическими методами углубленно изучались физико-механическое состояние и фильтрационный режим грунта, сформировавшиеся в результате длительного протекания подобного деформационного процесса на фоне плавного и ограниченно усиливающегося фильтрационного [3, 4]. При таком подходе путем математического моделирования удавалось сделать только минимальную оценку возможных последствий частичного упорядочения структуры грунта. В действительности, за счет интенсивного снеготаяния, ливневых осадков, увлажнительных мероприятий, а особенно при вводе в эксплуатацию дренажей, гидротехнических сооружений в несвязных и слабосвязных грунтах складывается экстремальная обстановка, которая благоприятствует активному развитию фильтрационных деформаций. Их степень и область распространения из-за вносимых в фильтрационный поток извне весьма серьезных возмущений, даже несмотря на обычную кратковременность последних, часто существенно превосходят аналогичные показатели деформаций в первом случае, который на практике реализуется при медленном изменении метеорологических и техногенных факторов. Как следствие, во втором случае оказывается, что деформационный эффект намного значимее, а установившийся фильтрационный режим тесно связан со своей предысторией. Очевидно, что для надежного учета в инженерных расчетах сопутствующего указанному эффекту улучшения проницаемости грунта необходимо опираться на нестационарные модели фильтрации. Вместе с тем важное значение с формальной точки зрения приобретает корректность выбора исходного водно-физического состояния грунта, так как оно во многом определяет фильтрационный процесс на начальной стадии, когда регулирующие его элементы воздействуют непосредственно на окружающую их жидкость и опосредовано на скелет среды наиболее сильно. Поэтому на данной стадии, в течение которой деформации

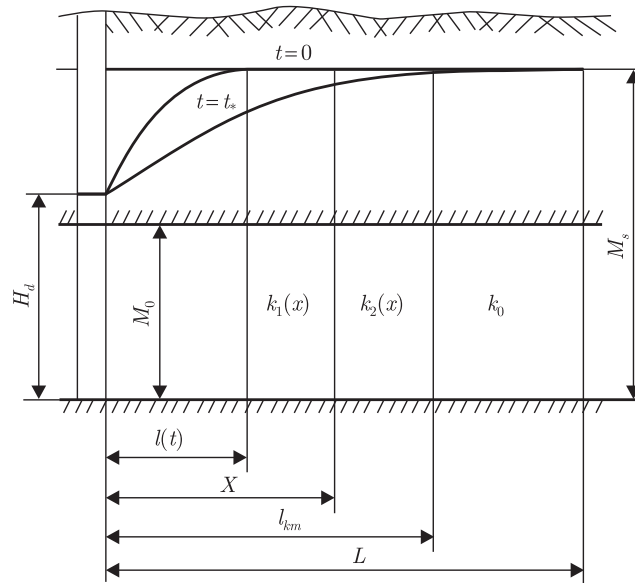


Рис. 1. Схема неустановившейся плоской напорной фильтрации в несвязном грунте с локально упорядоченной структурой

в основном успевают завершиться, целесообразно выделять зону влияния этого элемента. А поскольку целью настоящей работы является приближенная к реальности оценка ожидаемой интенсификации притока к водоприемникам вследствие локального упорядочения структуры несвязного грунта, то математический анализ проводился последовательно для нестационарных и стационарных условий с детальным учетом специфики поведения коэффициента фильтрации в области деформаций. Базовой для такого анализа стала математическая модель неустановившейся плоской напорной фильтрации к совершенному линейному водоприемнику (водозабору) в однородном недеформированном грунте (рис. 1). Соответствующая задача для начальной фильтрации в пределах выделенной расширяющейся зоны влияния водоприемника протяженностью l формулируется следующим образом:

$$k_0 M_0 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial h}{\partial t}; \quad (1)$$

$$x = 0, \quad h = H_d; \quad x = L, \quad h = M_s; \quad (2)$$

$$x = l(t), \quad h = M_s; \quad \frac{\partial h}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$t = 0, \quad h = M_s; \quad l = 0. \quad (4)$$

Здесь k_0 — коэффициент фильтрации; M_0 — мощность водоносного пласта; h — пьезометрический напор; μ — упругая водоотдача; H_d , M_s — напоры на водоприемнике и водосточнике; L — расстояние между ними; l — координата подвижной границы зоны влияния.

Приближенное решение задачи (1)–(4) построено в предположении, что сокращение объема воды в пласте со временем происходит равномерно вдоль фильтрационного течения и, следовательно, правый член в уравнении (1) является функцией только от t . После введения безразмерных величин $\tilde{h} = (h - H_d)/(M_s - H_d)$, $\tilde{x} = x/L$, $\tilde{t} = k_0 M_0 t / (\mu L^2)$, $\tilde{l} = l/L$

и несложных выкладок получены простейшее выражение для относительного расхода водоприемника \bar{q}_0 и закономерность перемещения границы зоны его влияния

$$\bar{q}_0(\bar{t}) = \frac{q_0(t)}{k_0(M_s - H_d)I_0} = \frac{1}{\sqrt{3\bar{t}}}, \quad (5)$$

$$\bar{l}(\bar{t}) = \sqrt{12\bar{t}}, \quad (6)$$

где $I_0 = (M_s - H_d)/L$. В соответствии с (6) относительная продолжительность начальной стадии \bar{t}_* , принимая во внимание условие $\bar{l}(\bar{t}_*) = 1$, составила 1/12.

Правомочность принятого выше допущения относительно характера изменения фильтрационного расхода в области движения обосновывается сопоставлением представленного приближенного решения задачи (1)–(4) и точного решения аналогичной задачи без предварительного ее упрощения. Последнее приведено в работе [5]. Для расчетов фильтрации на рассматриваемой стадии предпочтительнее решение, выраженное зависимостью

$$\tilde{h}(\bar{x}, \bar{t}) = \operatorname{erf} \frac{\bar{x}}{2\sqrt{\bar{t}}} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\operatorname{erfc} \frac{2n + \bar{x}}{2\sqrt{\bar{t}}} - \operatorname{erfc} \frac{2n - \bar{x}}{2\sqrt{\bar{t}}} \right), \quad (7)$$

где $\operatorname{erfc} y = 1 - \operatorname{erfc} y$, $\operatorname{erfc} y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\xi^2} d\xi$. Быстрая сходимость ряда в (7) имеет место

как раз при малых значениях \bar{t} , что характерно для начальной стадии. Из (7) вытекает формула для вычисления расхода \bar{q}_0 , а именно,

$$\bar{q}_0(\bar{t}) = \frac{1}{\sqrt{\pi\bar{t}}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2}{\bar{t}}\right) \right]. \quad (8)$$

Сравнение (5) и (8) показывает, что погрешность при вычислении расхода \bar{q}_0 по первой формуле стабильно минимальная и равна $1 - \sqrt{3/\pi}$, что составляет 2.3%. Таким образом привлечение приближенного решения для последующих оценок значимости деформационного эффекта прежде всего оправдывается благодаря его высокой точности. С другой стороны, массовая переориентация частиц скелета обуславливает при моделировании фильтрационного процесса незначительное возмущение его характеристик. Поэтому в первом приближении указанное решение должно давать в целом правильную картину пространственно-временных изменений градиента также и в деформируемом грунте. Кстати, этот прием ранее успешно применялся в теоретических исследованиях установившейся фильтрации в несвязном несупфозионном грунте [6, 7]. Итак, для текущего градиента $\bar{I}(\bar{x}, \bar{t})$, исходя из решения задачи (1)–(4), принимается следующее выражение:

$$\bar{I}(\bar{x}, \bar{t}) = \frac{1}{\sqrt{3\bar{t}}} - \frac{\bar{x}}{6\bar{t}}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что в сечении фильтрационного потока с координатой \bar{x}_m градиент \bar{I} достигнет своего максимума в момент времени

$$\bar{t}_m = \frac{x_m^2}{3}. \quad (10)$$

С физической точки зрения данный факт означает, что все несферические частицы скелета, которые здесь были способны в создавшихся гидродинамических условиях оптимизировать свое положение, реализовали такую возможность. Естественно, что отвечающее подобной ситуации значение коэффициента фильтрации необходимо зафиксировать. Итак, область деформаций в любой момент времени $t < t_*$ можно разделить на два участка, а именно $[0, X]$ и $[X, \bar{l}_k]$. Значение X вычисляется согласно (10) по формуле

$$X(\bar{t}) = \sqrt{3\bar{t}}, \quad (11)$$

а положение удаляющейся от водоприемника границы между деформированным и недеформированным грунтом предлагается находить с помощью формулы

$$\bar{l}_k(\bar{t}) = \sqrt{12\bar{t}} - 6\bar{t}\bar{I}_k, \quad (12)$$

которая вытекает из выражения (9) при $\bar{I} = \bar{I}_k$.

При определении величины $\bar{k}(\bar{x})$ в конце начальной стадии фильтрации, что требуется для последующих реальных оценок значимости упорядочения структуры несвязных грунтов, вводится относительный эффективный градиент напора \bar{I}_* как функция только от \bar{x} . Под ним понимается совокупность наибольших в пределах сформировавшейся в итоге области деформаций значений текущего градиента, имевших место в течение расчетного периода $[0, \bar{t}_*]$. Отмеченные значения могут быть, во-первых, абсолютными максимумами, если производная $\partial\bar{I}/\partial\bar{t}$ в промежуточный момент времени обращается в 0; во-вторых, условными максимумами, если она весь этот период положительная. Поэтому в вышеупомянутой области при особо благоприятных для развития фильтрационных деформаций условиях ($\bar{I}_k < 1$) следует выделить две характерные подобласти — $[0, X_m]$ и $[X_m, \bar{l}_{km}]$. В первой из них функции $\bar{I}(\bar{t})$ и $\bar{k}(\bar{t})$ успевают на протяжении расчетного периода достигнуть абсолютных максимумов, причем значения этих максимумов по мере удаления от водоприемника убывают, а при $\bar{x} = X_m = 1/2$ становятся наименьшими. Так,

$$\bar{I} = 1, \quad \bar{k} = \frac{\bar{k}_u + \bar{\alpha}}{\bar{K} + 1}. \quad (13)$$

Искомое распределение $\bar{I}_*(\bar{x})$ в пределах первой подобласти находится путем подстановки выражения $\bar{t}(\bar{x})$ (10) в представление для $\bar{I}(\bar{x}, \bar{t})$ (9). В результате получено

$$\bar{I}_*(\bar{x}) = \frac{1}{2\bar{x}} \quad \text{при} \quad \frac{1}{2} \geq \bar{x} \geq 0. \quad (14)$$

Во второй подобласти градиент \bar{I} является монотонно возрастающей со временем функцией, которая принимает наибольшие значения в конце расчетного периода. Предельная длина области деформаций \bar{l}_{km} вычисляется из (12) при $\bar{t} = \bar{t}_*$ и будет иметь вид

$$\bar{l}_{km} = 1 - 0,5\bar{I}_k. \quad (15)$$

Подстановка же значения $\bar{t} = \bar{t}_* = 1/12$ в (9) дает второй фрагмент $\bar{I}_*(\bar{x})$

$$\bar{I}_*(\bar{x}) = 2 - 2\bar{x} \quad \text{при} \quad \bar{l}_{km} \geq \bar{x} > \frac{1}{2}. \quad (16)$$

Легко убедиться, что при $\bar{x} = \bar{l}_{km}$ будут $\bar{I}_* = \bar{I}_k$ и значит $\bar{k} = 1$.

Однако в действительности гораздо чаще справедливо соотношение $\bar{I}_k > 1$, а деформации оказываются локализованными около водоприемника. В таком случае двухзначная функция $\bar{I}(\bar{t}; X)$ в первый раз достигает критического значения \bar{I}_k в фазе подъема за время

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{12\bar{I}_k^2} \left(1 - \sqrt{1 - 2\bar{I}_k X} \right). \quad (17)$$

Во второй раз это происходит уже в фазе спада градиента \bar{I} в момент времени

$$\bar{t}_2 = \frac{1}{12\bar{I}_k^2} \left(1 + \sqrt{1 - 2\bar{I}_k X} \right). \quad (18)$$

Тогда область деформации будет ограничена сечением $\bar{x} = X_k$, в котором максимальное значение \bar{I} составит \bar{I}_k . Согласно (17) и (18), подобное случится, если \bar{t}_1 сравняется с \bar{t}_2 . Для этого необходимо, чтобы

$$X = X_k = \frac{1}{2\bar{I}_k}. \quad (19)$$

Таким образом, эффективный градиент \bar{I}_* при $\bar{I}_k > 1$ имеет вид (14), а его областью определения является интервал

$$X_k = \frac{1}{2\bar{I}_k} \geq \bar{x} \geq 0.$$

Очевидно, что при $\bar{x} = X_k$ имеет место исходный коэффициент фильтрации ($\bar{k} = 1$).

Если теперь воспользоваться для эмпирической зависимости коэффициента \bar{k} от градиента \bar{I} аппроксимационным выражением из работ [8], то в обоих случаях ($\bar{I}_k > 1$, $\bar{I}_k < 1$) будет справедливо обобщенное представление

$$\bar{k}(\bar{I}_*) = \frac{\bar{k}_u \bar{I}_* + \bar{\alpha}}{\bar{I}_* + \bar{K}}, \quad (20)$$

где $\bar{k}_u = k_u/k_0$; $\bar{\alpha} = \bar{K} - (\bar{k}_u - 1)\bar{I}_k$; $\bar{K} = K/I_0$, k_u — предельный коэффициент фильтрации (все структурные частицы переориентированы); K — эмпирическая константа. С учетом же (14) и (16) окончательно получено

$$\bar{k}(\bar{x}) = \bar{k}_1(\bar{x}) = \frac{2\bar{\alpha}\bar{x} + \bar{k}_u}{2\bar{K}\bar{x} + 1} \quad \text{при} \quad X_{k,m} \geq \bar{x} \geq 0, \quad (21)$$

$$\bar{k}(\bar{x}) = \bar{k}_2(\bar{x}) = \frac{2\bar{k}_u + \bar{\alpha} - 2\bar{k}_u\bar{x}}{2 + \bar{K} - 2\bar{x}} \quad \text{при} \quad \bar{l}_{km} \geq \bar{x} > X_m. \quad (22)$$

Непосредственно деформационный эффект оценивается для условий установившейся напорной фильтрации между совершенными в гидродинамическом отношении контуром питания и водоприемником. Скоротечное упорядочение структуры несвязного грунта на прилегающем к водоприемнику участке обусловило здесь существенное улучшение проницаемости грунта. Соответствующая математическая модель с учетом непрерывности коэффициента фильтрации в области движения формулируется в безразмерной форме при ($\bar{I}_k > 1$ или $\bar{I}_k < 1$) следующим образом:

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left[\bar{k}_i(\bar{x}) \frac{d\bar{h}_i}{d\bar{x}} \right] = 0 \quad \text{при} \quad X_{k,m} \geq \bar{x} \geq 0 \quad (i = 1), \quad \bar{l}_{km} \geq \bar{x} > 0,5 \quad (i = 2), \quad (23)$$

$$\frac{d^2 \tilde{h}_0}{d\bar{x}^2} = 0 \quad \text{при} \quad 1 \geq \bar{x} > X_k \text{ или } \bar{l}_{km}; \quad (24)$$

$$\bar{x} = 0, \quad \tilde{h}_1 = 0; \quad \bar{x} = 1, \quad \tilde{h}_0 = 1. \quad (25)$$

Кроме того, в первом случае ($\bar{I}_k < 1$)

$$\bar{x} = X_m, \quad \tilde{h}_1 = \tilde{h}_2; \quad \frac{d\tilde{h}_1}{d\bar{x}} = \frac{d\tilde{h}_2}{d\bar{x}}; \quad \bar{x} = \bar{l}_{km}, \quad \tilde{h}_2 = \tilde{h}_0; \quad \frac{d\tilde{h}_2}{d\bar{x}} = \frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{x}}, \quad (26)$$

а во втором случае ($\bar{I}_k > 1$)

$$\bar{x} = X_k, \quad \tilde{h}_1 = \tilde{h}_0; \quad \frac{d\tilde{h}_1}{d\bar{x}} = \frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{x}}, \quad (27)$$

и второе уравнение в системе (23) исключается.

Важнейшим следствием полученного точного решения задачи (23)–(26) является формула для расчета относительного фильтрационного расхода

$$\bar{q}_\infty = (1 - \bar{l}_{km} + P_1 + P_2)^{-1}, \quad (28)$$

где

$$P_1 = \frac{\bar{K}}{2\bar{k}_u} \left[2\bar{l}_{km} - 1 + \left(\frac{2\bar{k}_u + \bar{\alpha}}{\bar{k}_u} - \frac{2 + \bar{K}}{\bar{K}} \right) \ln \frac{2\bar{k}_u(1 - \bar{l}_{km}) + \bar{\alpha}}{\bar{k}_u + \bar{\alpha}} \right],$$

$$P_2 = \frac{\bar{K}}{2\bar{\alpha}} \left[1 + \left(\frac{1}{\bar{K}} - \frac{\bar{k}_u}{\bar{\alpha}} \right) \ln(\bar{k}_u + \bar{\alpha}) \right].$$

Аналогично из решения задачи (23)–(25), (27) вытекает вторая основная расчетная формула

$$\bar{q}_\infty = (1 - X_k + P_3)^{-1}, \quad (29)$$

где

$$P_3 = \frac{\bar{K}}{\bar{\alpha}} \left[X_k + \left(\frac{1}{2\bar{K}} - \frac{\bar{k}_u}{2\bar{\alpha}} \right) \ln(2\bar{\alpha}X_k + \bar{k}_u) \right].$$

О важности корректного учета в фильтрационных расчетах реального деформирования несвязных грунтов свидетельствует проведенный на ряде характерных примеров количественный анализ. Исходная информация о модельных параметрах при этом подбиралась так, чтобы отразить разнообразие природных и техногенных условий. В частности, предельный коэффициент \bar{k}_u или изменялся непрерывно на интервале [1, 2], или фиксировался (1,5). Устойчивость грунта по отношению к гидродинамическому воздействию на него фильтрационного потока характеризуется двумя параметрами (\bar{K} , \bar{I}_k). В примерах \bar{K} менялся с дискретом 0,5 и выбирались три значения \bar{I}_k (0,5, 1, 1,5), что дало возможность проиллюстрировать базовые формулы (28), (29) и вместе с тем полно оценить значимость развившихся на начальной стадии фильтрационного процесса деформаций для притока к совершенному водоприемнику. Расчеты выполнялись по формулам (21), (22) и (28), (29). Также привлекались результаты теоретических исследований установившейся напорной фильтрации,

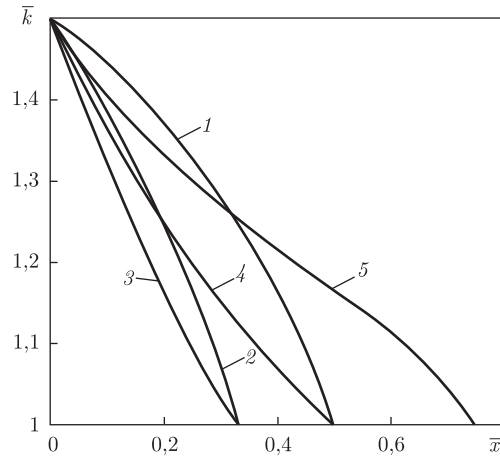


Рис. 2. Профили относительного коэффициента фильтрации в области деформаций:
 1, 2 – $\bar{K} = -0,5$; 3–5 – $\bar{K} = 0,5$; 1, 4 – $\bar{I}_k = 1$; 2, 3 – $\bar{I}_k = 1,5$; 5 – $\bar{I}_k = 0,5$

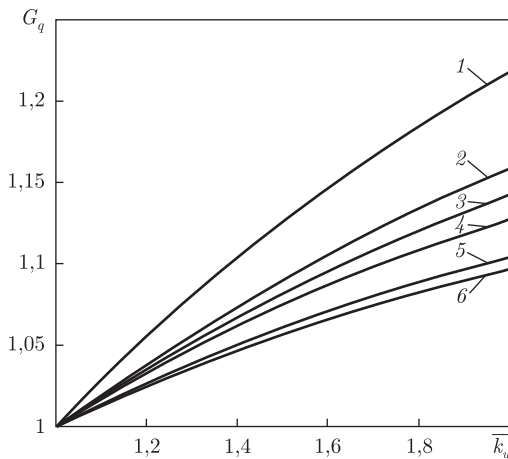


Рис. 3. Зависимость $G_q(\bar{k}_u)$:
 1, 4 – $\bar{K} = -0,5$; 2, 5 – $\bar{K} = 0,5$; 3, 6 – $\bar{K} = 1$; 1–3 – $\bar{I}_k = 1$; 4–6 – $\bar{I}_k = 1,5$

которая одновременно является причиной и следствием локального упорядочения структуры грунта [9]. Фактически подобный подход дает представление главным образом о минимально возможных последствиях специфической трансформации несвязного грунта для его регулируемого водного режима.

Данные вычислений профилей $\bar{k}(\bar{x})$ для $\bar{K} = \pm 0,5$ и разных \bar{I}_k приведены на рис. 2. Вследствие значительной гидродинамической силы на входе в водоприемник уже в самом начале его действия коэффициент \bar{k} здесь почти предельный (1,5), а с увеличением \bar{x} быстро убывает. Форма профилей существенно зависит от \bar{K} , а размеры профилей деформаций — от \bar{I}_k . В частности, при $\bar{I}_k = 0,5$ деформации охватывают большую часть области движения. И хотя деформации носят локальный и частичный характер, тем не менее они способны заметно интенсифицировать фильтрационный процесс. На рис. 3 и 4 показана зависимость относительного приращения фильтрационного расхода $q_\infty(G_{q_\infty})$ от степени деформаций (\bar{k}_u), произошедших на начальной стадии фильтрации. В качестве контроля взят аналогичный расход в недеформированном грунте $q_{\infty 0}$, так что $G_{q_\infty} = (q_\infty - q_{\infty 0})/q_{\infty 0}$. Сначала

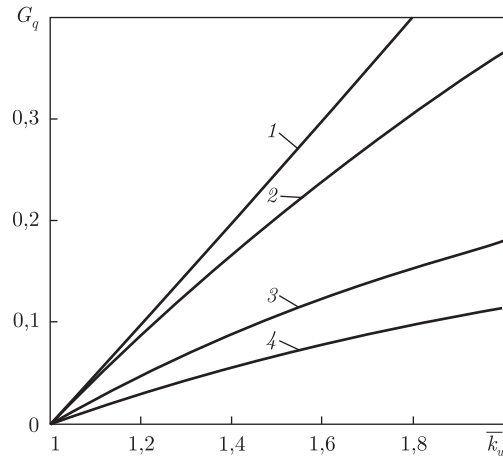


Рис. 4. Зависимость $G_q(\bar{k}_u)$:
 1, 2 – $\bar{I}_k = 0,5$; 3 – $\bar{I}_k = 1$; 4 – $\bar{I}_k = 1,5$

варьировались $\bar{K}(-0,5, 0,5, 1)$ и $\bar{I}_k(1, 1,5)$. Максимальный эффект имел место при меньших значениях \bar{K} , \bar{I}_k и большем \bar{k}_u , что отвечает грунту с рыхлой структурой и большим количеством несферических частиц скелета. Как видно из рис. 3, в таком случае расход увеличился на 21,8%. С ростом \bar{K} и особенно \bar{I}_k значимость деформаций хотя и ощущимо уменьшается, но учитывать их в фильтрационных расчетах все-таки целесообразно. Следует заметить, что фильтрационные деформации намного слабее влияют на плоские потоки, чем на осесимметричные и радиальные.

И в заключение сопоставлялись данные расчетов \bar{q}_∞ в случаях, когда на грунт воздействуют или существенно нестационарный, или стационарный фильтрационные процессы. Кривые зависимости $G_q(\bar{k}_u)$ на рис. 4 определялись при $\bar{K} = 0$ и тех же значениях \bar{I}_k . Согласно [9], деформации в напорных условиях будут протекать при условии ($\bar{I}_k > 1$, $\bar{I}_k < 1$), которое на практике редко выполняется. Тогда, следуя теории установившейся фильтрации в несвязных грунтах, деформации при $\bar{I}_k = 1$ и 1,5 вообще не должны происходить, а в соответствии с полученными выше результатами они приводят к серьезному приросту фильтрационного расхода. Ситуация кардинально меняется в тех исключительных случаях, когда $\bar{I}_k < 1$. Тогда нельзя ограничиваться рассмотрением деформаций только на начальной стадии, так как они будут продолжаться неограниченно долго и в конце концов обусловят существенно больший приток к водоприемнику (кривая 1).

1. Дмитриев А. Ф., Хлапук Н. Н., Дмитриев Д. А. Деформационные процессы в несвязных грунтах в придонной зоне и их влияние на работу осушительно-увлажнительных систем. – Ровно: Изд-во РГТУ, 2002. – 145 с.
2. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. – Москва: Гостехиздат, 1960. – 250 с.
3. Поляков В. Л., Желизко В. В. Установившаяся напорная фильтрация к малому сферическому стоку в несвязном несупфозионном грунте // Прикл. гідромеханіка. – 2009. – **11(83)**. – С. 68–79.
4. Поляков В. Л., Желизко В. В. Расчет установившейся фильтрации к систематическому дренажу при наличии инфильтрации в несвязных несупфозионных грунтах // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідраліки. – Київ: КНУБА, 2009. – Вип. 12. – С. 114–124.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – Москва: Высш. школа, 1967. – 599 с.
6. Іващенко А. П. Фізичне та математичне моделювання процесів деформацій ґрунту в наволодренній зоні // Вісн. УДАВГ. – Рівне, 1998. – Вип. 1, ч. 2. Гідротехнічне будівництво. – С. 31–35.

7. Хлапук М. М. Математичне моделювання взаємовпливових процесів фільтрації і механічної суфозії // Там само. – Рівне, 1997. – Вип. 1, ч. 2. Гідротехнічне будівництво. – С. 66–69.
8. Поляков В. Л. Установившийся приток к дренажу в несвязном грунте с локально-упорядоченной структурой // Доп. НАН України. – 2013. – № 2. – С. 57–64.
9. Желызко В. В. Плоская установившаяся напорная фильтрация в несвязном несупфозионном грунте // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Київ: КНУБА, 2010. – Вип. 13. – С. 143–147.

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Поступило в редакцію 17.07.2013

В. Л. Поляков

До оцінки ефекту упорядкування структури незв'язного ґрунту при нестабільній напорній плоскій фільтрації

Знайдено аналітичними методами і обґрунтовано наближений розв'язок нестационарної задачі плоскої напірної фільтрації на її початковій стадії в однорідному незв'язному недеформованому ґрунті. На його основі одержано вираз для профіля відносного коефіцієнта фільтрації ґрунту, частинки скелету якого протягом цієї стадії встигли переорієнтуватися вздовж потоку. Виконано оцінку наслідків вказаного ефекту для усталеного фільтраційного режиму при швидкоплинному і тривалому характері розвитку деформацій на прикладі лінійного досконалого водоприймача.

V. L. Polyakov

On the estimation of the cohesiveless soil structure ordering at a non-steady head plane groundwater flow

An approximate solution to the non-steady problem of a plane head groundwater flow is obtained and substantiated by analytical methods for the initial stage. On its basis, an expression is found for the relative hydraulic conductivity profile with regard for the reorientation of non-spherical structural particles along the flow by the end of the stage. Consequences of the deformation effect under steady-state conditions at fast and slow soil transformations in case of a linear perfect water intake are estimated.