

УДК 532.546

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПОРЯДОЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ БЕЗНАПОРНОЙ ПЛОСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В. Л. ПОЛЯКОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
polyakov_IGM@list.ru

Получено 23.11.2013

Получено приближенное решение нестационарной задачи безнапорной фильтрации в недеформированном однородном грунте к совершенной дрене на начальной стадии в гидравлической постановке. С использованием выражения для текущего градиента напора установлена закономерность изменения коэффициента фильтрации в области деформаций со временем вследствие переориентации частиц скелета несферической формы. В результате обстоятельного теоретического анализа действия дренажа в несвязном грунте показана значимость указанных фильтрационных деформаций для уровня режима и дренажного расхода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нестационарная фильтрация, несвязный грунт, фильтрационные деформации, дрена, переориентация, градиент напора, проницаемость

Одержано наближений розв'язок задачі неусталеної безнапірної фільтрації до досконалої дрени в недеформованому однорідному ґрунті на початковій стадії в гідравлічній постановці. З використанням виразу для поточного градієнта напору встановлена закономірність зміни коефіцієнта фільтрації в області деформацій з часом внаслідок переорієнтації часток скелету несферичної форми. Завдяки ґрунтовому теоретичному аналізу дії дренажу в незв'язному ґрунті показана значущість вказаних фільтраційних деформацій для рівня режиму і дренажної витрати.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: неусталена фільтрація, незв'язний ґрунт, фільтраційні деформації, дрена, переорієнтація, градієнт напору, проникність

An approximate solution was obtained of non-steady groundwater free flow to perfect drain in non-deformable uniform soil at initial stage in hydraulic approximation. Using the expression for head gradient a regularity was established of hydraulic conductivity change within deformation region as a result of non-spherical skeleton particles re-orientation. Detailed theoretical analysis of drain effect in cohesiveless soil showed significance of hydrodynamic deformations for water table dynamics and drainage discharge.

KEY WORDS: unsteady groundwater flow, cohesiveless soil, hydrodynamic deformations, drain, re-orientation, head gradient, permeability

ВВЕДЕНИЕ

Для фильтрационного режима естественных пористых сред характерна стабильность. Тем не менее, периодически природные и техногенные факторы вносят в него значительные возмущения. Вследствие них фильтрационный процесс существенно интенсифицируется, а в несвязных и слабосвязных грунтах создаются предпосылки для развития фильтрационных деформаций [1, 2]. В частности, наблюдается массовая переориентация несферических частиц скелета [3, 4]. Благодаря оптимизации их положения уменьшается гидравлическое сопротивление и, следовательно, возрастает проницаемость грунта, что способствует повышению эффективности управления вышеупомянутым режимом. Степень деформаций определяется гидродинамической силой, которая пропорциональна градиенту напора I . Поэтому при мо-

делировании деформационного процесса и анализе его последствий для работы водорегулирующих устройств ключевую роль играет связь коэффициента фильтрации k с градиентом I . Соответствующие эмпирические данные, согласно [5], целесообразно аппроксимировать следующей функцией:

$$k = \frac{k_u I + \alpha}{I + K}, \quad (1)$$

где k_u – предельный коэффициент фильтрации; $\alpha = k_0 k - (k_u - k_0) I_k$, k_0 – коэффициент фильтрации недеформированного грунта, I_k – критический градиент; K – эмпирическая постоянная.

Особенно большая гидродинамическая сила развивается при вводе в эксплуатацию гидротехнических и мелиоративных объектов, кратковременном поступлении в грунт большого объема воды. Тогда ввиду быстротечности фильтрационных деформаций [6] имеет смысл в фильтрационном процессе выделить начальную стадию. А поскольку

ку указанные деформации обуславливают обычно сравнительно небольшие изменения фильтрационных характеристик, то основой для их учета в инженерных расчетах вполне может стать решение подходящей задачи фильтрации в недеформированном грунте. Построение подобного решения задачи неустановившейся безнапорной плоской фильтрации в гидравлическом приближении и явилось первым этапом данной теоретической разработки. Обоснование аналогичного решения, но для напорных условий, выполнено в работе [7] и свидетельствует о его высокой точности. На втором этапе, исходя из уже полученного распределения текущего градиента $I(x, t)$, находился эффективный градиент $I_*(x)$. С использованием последнего и на базе представления (1) определялся профиль коэффициента фильтрации в конце начальной стадии $k_*(x)$. Наконец, на третьем этапе с привлечением величины k_* и опираясь на стационарную модель фильтрации в частично деформированном грунте между совершенными в гидравлическом отношении водоприемником и водоисточником, исследовалось влияние рассматриваемых деформаций на водно-физическое состояние грунта и прежде всего на расходную характеристику. Подобный упрощенный поэтапный способ учета фильтрационных деформаций в расчетах дренажей был предложен в работах [8, 9]. Ранее в цикле работ, например [10, 11], детально изучалась аналитическими методами установившаяся фильтрация и инициированные ею деформации. Таким образом, удалось получить минимальные оценки значимости локального упорядочения структуры несвязных грунтов для регулируемого водного режима. Но только опираясь на нестационарные модели с начальными условиями, отражающими исходные напряженные водно-физические условия в грунте и сопредельных средах, реально выявить истинные масштабы деформаций и изменения в связи с ними фильтрационной обстановки.

1. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

В качестве базовой используется нелинейная модель неустановившейся фильтрации в гидравлическом приближении, описывающая ускоренный отвод избыточной воды из однородного недеформированного грунта с изначально высоким уровнем грунтовых вод в совершенный линейный приемник (канал) (рис. 1). Уравнение фильтрации и оператор граничных и начальных условий применительно к ее начальной стадии имеют следующий

вид:

$$k_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \mu \frac{\partial h}{\partial t}; \quad (2)$$

$$x = 0, \quad h = M_d;$$

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

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

Здесь h – пьезометрический напор; μ – коэффициент осредненной водоотдачи; M_d, M_s – уровни воды в водоприемнике и водоисточнике; l – длина зоны влияния водоприемника.

После введения безразмерных переменных и параметров задача (2)–(4) формулируется таким образом:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[(\tilde{h} + \bar{M}_d) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \bar{x}} \right] = \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \bar{t}}; \quad (5)$$

$$\bar{x} = 0, \quad \tilde{h} = 0; \quad \bar{x} = \bar{l}(\bar{t}), \quad \tilde{h} = 1; \quad \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \bar{x}} = 0; \quad (6)$$

$$\bar{t} = 0, \quad \tilde{h} = 1; \quad \bar{l} = 0; \quad (7)$$

где

$$\bar{x} = \frac{x}{L}; \quad \tilde{h} = \frac{h - M_d}{M_s - M_d}; \quad \bar{t} = \frac{k_0 (M_s - M_d) t}{\mu L^2};$$

$$\bar{l} = \frac{l}{L}; \quad \bar{M}_{d,s} = \frac{M_{d,s}}{M_s - M_d};$$

L – расстояние между источником и приемником. Решение задачи (5)–(7), как и аналогичной задачи в работе [7], найдено благодаря осреднению правой части уравнения (5) по \bar{x} в пределах зоны влияния. Промежуточные выкладки в силу их громоздкости опускаются. Основопологающей в полученном приближенном решении является зависимость относительного расхода водоприемника \bar{q}_0 от времени \bar{t} в виде обратной интегральной функции:

$$\bar{t} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\bar{M}_d}} \int_{\infty}^{\bar{q}_0} \frac{1}{\eta} \times \quad (8)$$

$$\times \int_0^{1/\eta} \frac{\eta \bar{x}^2 - (1 + 2\bar{M}_d) \bar{x}}{\sqrt{(1 + 2\bar{M}_d) \bar{M}_d^2 + 2(1 + 2\bar{M}_d) \eta \bar{x} - \eta^2 \bar{x}^2}} d\bar{x} d\eta,$$

где $\bar{q}_0 = q_0 / (k_0 L I_0^2)$, $I_0 = (M_s - M_d) / L$. При известном расходе \bar{q}_0 приведенный напор (УГВ) предлагается рассчитывать по формуле

$$\tilde{h}(\bar{x}, \bar{t}) = \sqrt{\bar{M}_d^2 + 2\bar{q}_0(\bar{t}) \bar{x} - \frac{\bar{q}_0^2(\bar{t}) \bar{x}^2}{1 + 2\bar{M}_d}} - \bar{M}_d. \quad (9)$$

Но особенно важной в дальнейшем является следующая формула относительно текущего градиента:

$$\bar{I}(\bar{x}, \bar{t}) = \quad (10)$$

$$= \frac{\bar{q}_0(\bar{t}) [1 + 2\bar{M}_d - \bar{q}_0(\bar{t}) \bar{x}]}{\sqrt{(1 + 2\bar{M}_d)^2 [\bar{M}_d^2 + 2\bar{q}_0(\bar{t}) \bar{x}] - (1 + 2\bar{M}_d) \bar{q}_0^2(\bar{t}) \bar{x}^2}}$$

Наконец, закон расширения зоны влияния приемника будет

$$\bar{l}(\bar{t}) = \frac{1 + 2\bar{M}_d}{\bar{q}_0(\bar{t})}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что в конце начальной стадии фильтрации ($\bar{t} = \bar{t}_*$) с учетом $\bar{l}(\bar{t}_*) = 1$ расход \bar{q}_0 снизится до величины $\bar{q}_{0*} = 1 + 2\bar{M}_d$. Таким образом, момент времени \bar{t}_* следует вычислять из формулы (8), положив в ней $\bar{q}_0 = \bar{q}_{0*}$.

На представленном выше решении, а фактически на зависимости (10) базируется определение функции $k_*(x)$, которая полно характеризует степень и распространение рассматриваемых деформаций в области движения к концу начальной стадии фильтрации. Также при этом принимается во внимание, что, во-первых, деформации возникают только при $I > I_k$, во-вторых, действительный коэффициент фильтрации в соответствии с (1) и (10) является переменной величиной, которая, как и градиент I , прежде всего монотонно растет со временем. Однако из физических соображений очевидно, что его максимальное значение которое достигается в данных условиях, должно фиксироваться. Как раз совокупность таких значений и описывается функцией $k_*(x)$. При ее конкретизации необходимо отдельно рассмотреть две ситуации. Более сложная складывается, если структура грунта имеет низкую устойчивость по отношению к гидродинамическим воздействиям. Тогда в области деформаций приходится выделять два участка из-за принципиального отличия в поведении функции $I(t; x)$ на протяжении начальной стадии. На ближнем к водоприемнику участке $[0, X_m]$ указанная функция и тесно связанная с ней функция $k(t; x)$ успевают за время t_* достигнуть максимальных значений $I_*(x)$ и $k_*(x)$, а на дальнем участке $[X_m, l_{km}]$ не успевают. Процедура построения эффективного профиля $\bar{k}_*(\bar{x})$ применительно к напорным условиям подробно изложена в работе [7], а для безнапорных предполагает последовательное выполнение следующих операций. Сначала следует найти имеющий физический смысл корень φ^* кубического уравнения

$$\varphi^3 - 3(1 + 2\bar{M}_d)\varphi^2 + (1 + 2\bar{M}_d) \times \quad (12)$$

$$\times (1 + 2\bar{M}_d - 2\bar{M}_d^2)\varphi + \bar{M}_d^2(1 + 2\bar{M}_d)^2 = 0.$$

Затем рассчитать положение границы между выделенными участками:

$$X_m = \frac{\varphi^*}{1 + 2\bar{M}_d}, \quad (13)$$

и протяженность области деформаций

$$\bar{l}_{km} = 1 - \sqrt{1 - \frac{(1 + 2\bar{M}_d)^2 - \bar{M}_d^2 \bar{I}_k^2}{(1 + 2\bar{M}_d)^2 + \bar{I}_k^2 + 2\bar{M}_d \bar{I}_k^2}}. \quad (14)$$

Тогда относительный эффективный градиент $\bar{I}_*(\bar{x})$ состоит из двух следующих фрагментов:

$$\bar{I}_{*1}(\bar{x}) = \frac{\psi}{\bar{x}}, \text{ при } X_m \geq \bar{x} \geq 0; \quad (15)$$

$$\bar{I}_{*2}(\bar{x}) = \frac{(1 + 2\bar{M}_d)(1 - \bar{x})}{\sqrt{\bar{M}_d^2 + (1 + 2\bar{M}_d)(2\bar{x} - \bar{x}^2)}},$$

при $\bar{l}_{km} \geq \bar{x} > X_m$; (16)

где

$$\psi = \frac{(1 + 2\bar{M}_d)\varphi^* - \varphi^{*2}}{\sqrt{(1 + 2\bar{M}_d)^2(\bar{M}_d^2 + 2\varphi^*) - \varphi^{*2}(1 + 2\bar{M}_d)}}.$$

В соответствии с (1) и (15), (16) искомый профиль $\bar{k}_*(\bar{x})$ также образуется двумя функциями $\bar{k}_{1}(\bar{x})$, $\bar{k}_{2}(\bar{x})$ со смежными областями определения, которые согласно (1) могут быть представлены в общем виде

$$\bar{k}_{1,2}(\bar{x}) = \frac{\bar{k}_u \bar{I}_{*1,2}(\bar{x}) + \bar{\alpha}}{\bar{I}_{*1,2}(\bar{x}) + \bar{K}}. \quad (17)$$

В частности, на участке $[0, X_m]$ будет иметь место

$$\bar{k}_1(\bar{x}) = \frac{\bar{\alpha}\bar{x} + \bar{k}_u\psi}{\bar{K}\bar{x} + \psi}. \quad (18)$$

Вторая ситуация в практике фильтрации встречается гораздо чаще и проще с формальной точки зрения. Тогда градиент \bar{I} и коэффициент \bar{k} в состоянии во всей области деформаций $[0, X_k]$ достигнуть за время \bar{t}_* абсолютных максимумов, множество которых и составит зависимость \bar{k}_* от \bar{x} . В таком случае также сначала вычисляются значение корня φ^* из уравнения (12) и координата границы области деформаций в конце начальной стадии:

$$X_k = \frac{\psi}{\bar{I}_k}. \quad (19)$$

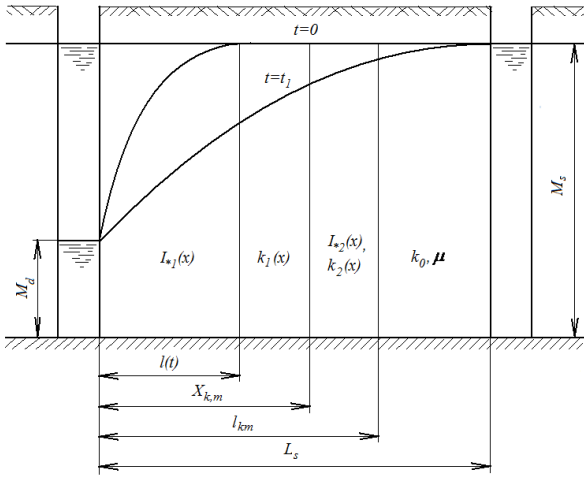


Рис. 1. Схема неустановившейся плоской безнапорной фильтрации на начальной стадии к совершенному водоприемнику в грунте с локально упорядоченной структурой

Итак, во всей области $[0, X_k]$ следует в качестве относительного эффективного градиента принимать выражение (15) с заменой X_m на X_k и, следовательно, эффективный коэффициент \bar{k}_* здесь будет характеризоваться функцией $\bar{k}_1(\bar{x})$ (18).

Так как найденная зависимость $\bar{k}_*(\bar{x})$ в целом правильно отражает улучшение проницаемости грунта вследствие произошедшего в наиболее ответственный период работы водоприемника упорядочения структуры несвязного грунта, то теперь можно проанализировать его последствия для фильтрационного режима. Сравнительно просто это сделать благодаря строгому решению стационарной математической задачи плоской безнапорной фильтрации в деформированном грунте. Для учета его соответствующего физико-механического состояния в области деформаций выделяются два характерных участка (рис. 1), что свойственно первой ситуации, а если исключить второй участок и заменить X_m на X_k , то и второй ситуации. Тогда постановка указанной задачи в более сложном случае будет

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left[\bar{k}_i(\bar{x}) (\tilde{h}_i + \bar{M}_d) \frac{d\tilde{h}_i}{d\bar{x}} \right] = 0; \quad (20)$$

$$X_{m,k} \geq \bar{x} \geq 0 (i = 1); \quad \bar{l}_{km} \geq \bar{x} > X_{m,k} (i = 2);$$

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left[(\tilde{h}_0 + \bar{M}_d) \frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{x}} \right] = 0; \quad 1 \geq \bar{x} > \bar{l}_{km}; \quad (21)$$

$$\bar{x} = 0, \quad \tilde{h}_1 = 0; \quad \bar{x} = 1, \quad \tilde{h}_0 = 1; \quad (22)$$

$$\bar{x} = X_m, \quad \tilde{h}_1 = \tilde{h}_2; \quad \frac{d\tilde{h}_1}{d\bar{x}} = \frac{d\tilde{h}_2}{d\bar{x}};$$

$$\bar{x} = \bar{l}_{km}, \quad \tilde{h}_2 = \tilde{h}_0; \quad \frac{d\tilde{h}_2}{d\bar{x}} = \frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{x}}. \quad (23)$$

Если же область деформаций продолжается до сечения $\bar{x} = X_k$, то условия (23) заменяются на пару условий:

$$\bar{x} = X_k, \quad \tilde{h}_1 = \tilde{h}_0; \quad \frac{d\tilde{h}_1}{d\bar{x}} = \frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{x}}. \quad (24)$$

Решение задачи (20)-(23) выражается рядом зависимостей. Важнейшую роль при этом играет формула для расчета относительного фильтрационного расхода

$$\bar{q}_\infty = \frac{1 + 2\bar{M}_d}{2(P_{1m} + P_{2m} + 1 - \bar{l}_{km})}. \quad (25)$$

Здесь

$$P_{1m} = \frac{\bar{K}}{\bar{\alpha}} \left[X_m + \frac{\psi}{\bar{\alpha}\bar{K}} (\bar{\alpha} - \bar{k}_u \bar{K}) \ln \left(1 + \frac{\bar{\alpha} X_m}{\bar{k}_u \psi} \right) \right]; \quad (26)$$

$$P_{2m} = \int_{X_m}^{\bar{l}_{km}} \frac{d\bar{x}}{\bar{k}_2(\bar{x})}; \quad (27)$$

$\bar{k}_2(\bar{x})$ имеет вид (17) с учетом (16); \bar{l}_{km} вычисляется по формуле (14); X_m – по (13). Во второй ситуации для нахождения \bar{q}_∞ также можно воспользоваться формулой (25), в которой предварительно необходимо положить $P_{2m} = 0$ и заменить в (26) X_m на X_k согласно (19).

При установленной величине \bar{q}_∞ распределение приведенного напора в области движения определяется с помощью следующей системы зависимостей:

$$\tilde{h}_1(\bar{x}) = \sqrt{2\bar{q}_\infty P_1(\bar{x}) + \bar{M}_d^2} - \bar{M}_d, \quad (28)$$

$$\tilde{h}_2(\bar{x}) = \sqrt{2\bar{q}_\infty [P_{1m} + P_2(\bar{x})] + \bar{M}_d^2} - \bar{M}_d, \quad (29)$$

$$\tilde{h}_0(\bar{x}) = \sqrt{(1 + \bar{M}_d)^2 - 2\bar{q}_\infty (1 - \bar{x})} - \bar{M}_d, \quad (30)$$

где $P_1(\bar{x})$, $P_2(\bar{x})$ имеют вид (24), (25) после замены X_m и \bar{l}_{km} на \bar{x} .

Реализованный ранее подход к изучению вклада деформационного процесса в фильтрационный основывался исключительно на стационарных моделях. Его применение в данных условиях предполагает решение математической задачи, включающей на интервале $1 \geq \bar{x} > \bar{l}_k$ уравнение (21), второе условие (22), а также

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left[\frac{\bar{k}_u \bar{I} + \bar{\alpha}}{\bar{I} + \bar{K}} (\tilde{h}_I + \bar{M}_d) I \right] = 0,$$

при $\bar{L}_k \geq \bar{x} \geq 0$; (31)

$\bar{x} = 0, \quad \tilde{h}_I = 0; \quad \bar{x} = \bar{L}_k, \quad \tilde{h}_I = \tilde{h}_0;$

$\frac{d\tilde{h}_I}{d\bar{x}} = \frac{d\tilde{h}_0}{d\bar{x}} = \bar{I}_k;$ (32)

где \tilde{h}_I – приведенный пьезометрический напор в области деформаций длиной L_k .

Получено строгое решение задачи (21), (22), (31), (32) и в первую очередь расчетное уравнение относительно расхода \bar{q}_∞ :

$\bar{L}_k(\bar{q}_\infty) - \bar{q}_\infty \int_{\bar{I}_k}^{\bar{I}_d(\bar{q}_\infty)} F_I(\xi) d\xi = 0.$ (33)

Здесь

$\bar{L}_k(\bar{q}_\infty) = 1 - \frac{(1 + \bar{M}_d)^2}{2\bar{q}_\infty} + \frac{\bar{q}_\infty}{2\bar{I}_k^2},$

$F_I(\xi) = \frac{\bar{k}_u \xi^2 + 2\bar{k}_u \bar{K} \xi + \bar{\alpha} \bar{K}}{\xi^3 (\bar{k}_u \xi + \bar{\alpha})^2},$ (34)

$\bar{I}_d(\bar{q}_\infty) = \bar{I}(0, \bar{q}_\infty) =$ (35)

$= \frac{1}{2\bar{k}_u} \left(\frac{\bar{q}_\infty}{\bar{M}_d} - \bar{\alpha} + \sqrt{\left(\frac{\bar{q}_\infty}{\bar{M}_d} - \bar{\alpha} \right)^2 + 4 \frac{\bar{k}_u \bar{K} \bar{q}_\infty}{\bar{M}_d}} \right).$

Изменение приведенного напора в области деформаций описывается обратной функцией

$\bar{x} = \bar{L}_k - \bar{q}_\infty \int_{\bar{I}_k}^{\bar{I}(\tilde{h}_I, \bar{q}_\infty)} F_I(\xi) d\xi,$ (36)

где

$\bar{I}(\tilde{h}_I, \bar{q}_\infty) = \frac{1}{2\bar{k}_u} \times$ (37)

$\times \left(\frac{\bar{q}_\infty}{\tilde{h}_I + \bar{M}_d} - \bar{\alpha} + \sqrt{\left(\frac{\bar{q}_\infty}{\tilde{h}_I + \bar{M}_d} - \bar{\alpha} \right)^2 + 4 \frac{\bar{k}_u \bar{K} \bar{q}_\infty}{\tilde{h}_I + \bar{M}_d}} \right).$

В редких случаях, когда справедливо условие $\bar{q}_\infty \geq \bar{I}_k(1 + \bar{M}_d)$, деформации охватывают всю область движения. Исходная модель при этом содержит уравнение (31) и условия (22). Ее строгое решение тогда выражается следующим образом:

$\bar{x} = 1 - \bar{q}_\infty \int_{\bar{I}_L(\bar{q}_\infty)}^{\bar{I}(\tilde{h}_I, \bar{q}_\infty)} F_I(\xi) d\xi,$ (38)

где $\bar{I}_L(\bar{q}_\infty) = \bar{I}(1, \bar{q}_\infty)$. Тогда фильтрационный расход устанавливается подбором из уравнения

$\bar{q}_\infty \int_{\bar{I}_L(\bar{q}_\infty)}^{\bar{I}_d(\bar{q}_\infty)} F_I(\xi) d\xi = 1,$ (39)

а коэффициент фильтрации в пределах области деформаций \bar{k}_∞ предлагается находить последовательно и в зависимости от соотношения между \bar{q}_∞ и $\bar{I}_k(1 + \bar{M}_d)$. Так, при $\bar{q}_\infty < \bar{I}_k(1 + \bar{M}_d)$ сначала, исходя из (36), устанавливается связь между \bar{x} и \bar{I} , а затем для каждого \bar{x} с помощью представлений (1), (17) определяется отвечающее ему значение \bar{k}_∞ . Если же $\bar{q}_\infty > \bar{I}_k(1 + \bar{M}_d)$, то предварительно вычисляется граничный градиент \bar{I}_L , потом на базе (38) текущий градиент \bar{I} как функция от \bar{x} и, наконец, $\bar{k}_\infty(\bar{x})$ снова по выражениям (1), (17).

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Реальность серьезной недооценки деформаций в несвязных грунтах при использовании только стационарных моделей фильтрации демонстрируется на расчетах ряда характерных примеров, опираясь на два подхода к нахождению функции распределения $\bar{k}(\bar{x})$, которые отражают интенсивное кратковременное и медленное длительное упорядочение структуры среды. Особое внимание обращено на первый подход, обеспечивающий более правдоподобные для мелиоративной и гидротехнической практики результаты. И именно он, как будет видно ниже, ведет к заметным изменениям и фильтрационных характеристик, и действия водорегулирующих устройств. Предметом расчетов стали относительные величины – профиль коэффициента фильтрации $\bar{k}(\bar{x})$, а также расход водоприемника \bar{q}_0 в конце начальной стадии фильтрации (\bar{k}_*, \bar{q}_0*) и после неограниченно долгого протекания фильтрационного процесса ($\bar{k}_\infty, \bar{q}_\infty$). При этом варьировались непрерывно \bar{k}_u (от 1 до 2) и дискретно $\bar{M}_d(0, 1.5), \bar{I}_k(0.5, 1, 1.5), \bar{K}(-0.5, 1, 0.5)$.

Показательным для анализа рассматриваемого типа фильтрационных деформаций является обусловленное ими повышение проницаемости грунта, что непосредственно и предопределяет усиление течения грунтовых вод. Так как значения предельного коэффициента \bar{k}_u в первой серии примеров одинаковые и равны 1.5, то масштабы деформаций определяются главным образом размерами соответствующей области ($X_k, \bar{I}_{km}, \bar{L}_k$). Эффективный $\bar{k}_*(\bar{x})$ и стационарный $\bar{k}_\infty(\bar{x})$ профи-

ли рассчитывались параллельно при неустановившемся притоке к водоприемнику по формулам (15)–(17), а при строго установившемся – согласно (17), причем зависимость $\bar{I}(\bar{x})$ находилась из уравнений (36) или (38). Данные вычислений величин $\bar{k}_*(\bar{x})$, $\bar{k}_\infty(\bar{x})$ при $\bar{k}_u = 1.5$, $\bar{M}_d = \bar{K} = 0$ приведены на рис. 2. Если $\bar{I}_k = 1.5$, то длина области деформаций в первом случае (на момент времени \bar{t}_*) будет в полтора раза больше, чем во втором (крайние точки на кривых 4, 6). При $\bar{I}_k = 1$ указанные точки практически совпадают, но характер изменения функций $\bar{k}_*(\bar{x})$ и $\bar{k}_\infty(\bar{x})$ здесь, как и при $\bar{I}_k = 1.5$, существенно отличается. Очевидно, что линейные профили (3, 4) обеспечат больший приток к водоприемнику, чем вогнутые (5, 6). Совершенно иначе соотносятся профили $\bar{k}_*(\bar{x})$ и $\bar{k}_\infty(\bar{x})$ при $\bar{I}_k = 0.5$. В подобном малореальном случае уже фильтрационный процесс даже при невысокой интенсивности, но за счет неограниченной длительности протекания в состоянии инициировать такие деформации, которые в конце концов охватят всю область движения (кривая 2). Вместе с тем, несмотря на очень сильную приточность к водоприемнику в самом начале расчетного периода, вследствие малости зоны его влияния профиль $\bar{k}_*(\bar{x})$ распространится примерно на половину указанной области.

Но особенно наглядными при выявлении значимости фильтрационных деформаций в экстремальных условиях, периодически складывающихся в грунте, являются результаты многочисленных расчетов установившегося фильтрационного расхода \bar{q}_∞ с привлечением данных об увеличении коэффициента фильтрации или в начальный период неустановившегося притока к водоприемнику, или вследствие длительного взаимовлияния совместно и плавно протекавших фильтрационного и деформационного процессов. В первом случае искомый расход вычислялся по формуле (25), во втором – подбором из уравнения (33). Деформационный эффект выделялся и измерялся в относительных единицах. С этой целью введен параметр G_q следующим образом:

$$G_q = \frac{q_\infty - q_{\infty 0}}{q_{\infty 0}},$$

где $q_{\infty 0}$ – фильтрационный расход в недеформированном грунте, равный $0.5(1 + 2\bar{M}_d)$. Рис. 3, 4 иллюстрируют усиление установившегося притока к водоприемнику за счет (локального) упорядочения структуры грунта при $\bar{K} = 0$ и двух значениях \bar{M}_d . И здесь также принципиальное значение приобретает прочность фиксации структурных частиц. В наиболее благоприятной для де-

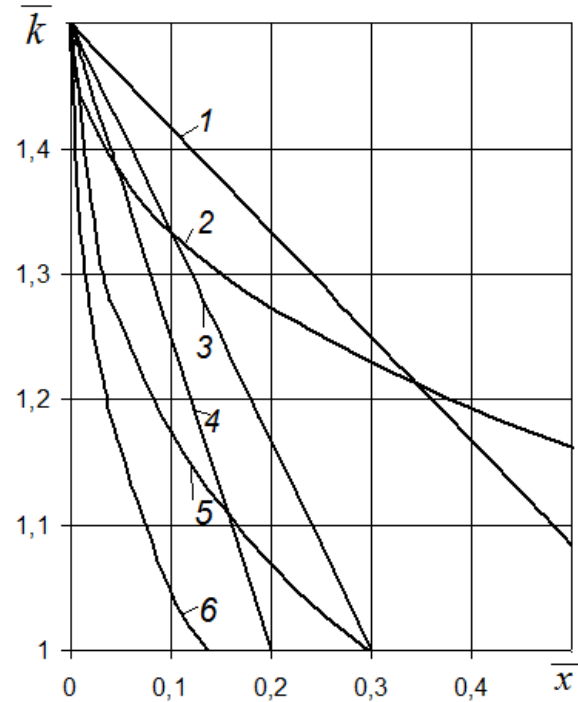


Рис. 2. Профили относительного коэффициента фильтрации в области деформаций:

1, 3, 4 – \bar{k}_* ; 2, 5, 6 – \bar{k}_∞ ; 1, 2 – $\bar{I}_k = 0.5$;
3, 5 – $\bar{I}_k = 1$; 4, 6 – $\bar{I}_k = 1.5$

формаций ситуации ($\bar{I}_k = 0.5$), когда они постепенно охватывают всю область движения, имеет место максимальное увеличение фильтрационного расхода, достигающее 50% при $\bar{k}_u = 2$, $\bar{M}_d = 1.5$. Вследствие активного неограниченного во времени деформирования грунта соответствующие кривые 1 располагаются намного выше кривых 2, соответствующих быстротечному деформированию. Однако, как правило, деформации протекают преимущественно на протяжении начальной стадии, когда на скелет грунта кратковременно воздействует значительная гидродинамическая сила. Поэтому кривые 5, 6, вычисленные в предположении стабилизированного фильтрационного режима и физико-механического состояния грунта, оказались заметно ниже кривых 3, 4. В пользу важности корректного учета деформаций также свидетельствуют вполне реальные ситуации, когда согласно подходу, опирающемуся на модель нестационарной фильтрации, происходит переориентация частиц и коэффициент фильтрации при этом ощутимо увеличивается. В то же время, согласно подходу, основывающемуся исключительно на модели стационарной фильтрации, ее асимптотически нарастающая интенсивность даже при $t \rightarrow \infty$

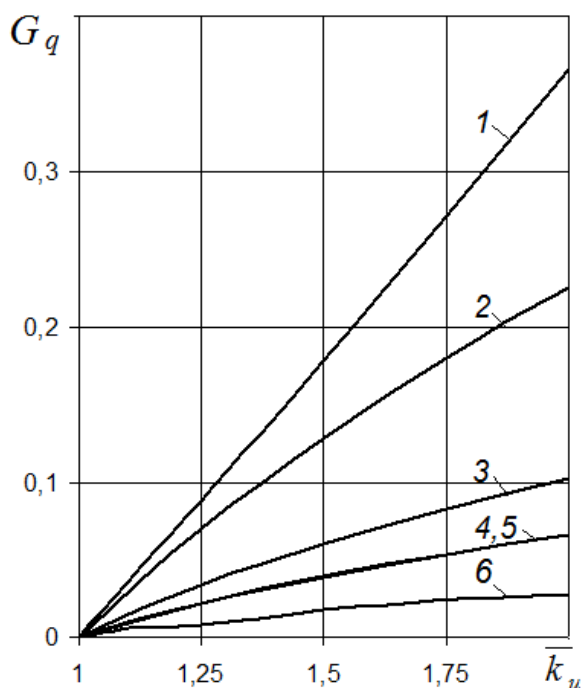


Рис. 3. Зависимость $G_q(\bar{k}_u)$:
 1, 4, 6 – по уравнению (33); 2, 3, 5 – по формуле (25);
 1, 2 – $\bar{I}_k = 0.5$; 3, 4 – $\bar{I}_k = 1$; 5, 6 – $\bar{I}_k = 1.5$

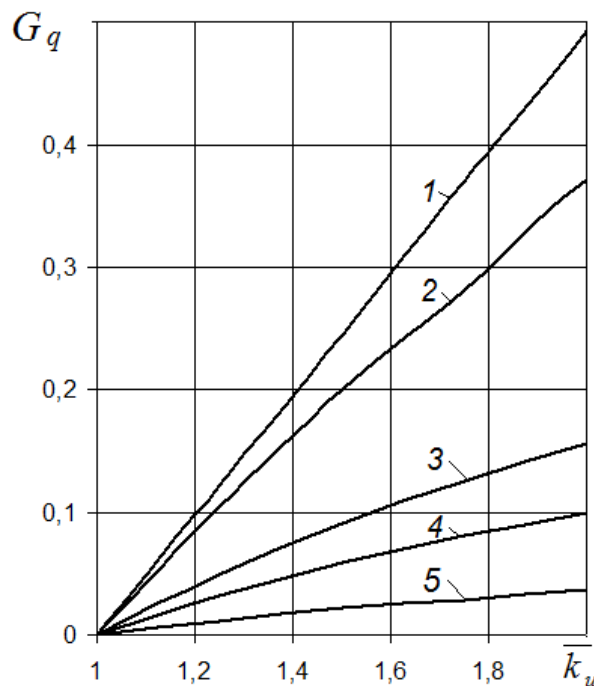


Рис. 4. Зависимость $G_q(\bar{k}_u)$:
 1, 5 – по уравнению (33); 2–4 – по формуле (25);
 1, 2 – $\bar{I}_k = 0.5$; 3, 5 – $\bar{I}_k = 1$; 4 – $\bar{I}_k = 1.5$

оказывается недостаточной, чтобы развернуть несферические частицы. В рассчитанных примерах подобное наблюдается при $\bar{I}_k = 1.5$ и $\bar{M}_d = 1.5$. Но уже снижение \bar{M}_d до 0 обеспечивает достаточное для начала деформаций увеличение гидродинамической силы (кривая 6).

Кроме того, представляет интерес сравнение расходной характеристики в деформированном грунте при безнапорной и напорной [7] фильтрации вследствие принципиального различия форм соответствующих пьезометрических поверхностей. В первом случае гидродинамическая сила распределяется в области фильтрации существенно неравномернее, что ведет к большим локализации и глубине деформаций. Оба фактора влияют на деформационный эффект противоположным образом и в итоге практически компенсируют друг друга. Поэтому в обоих случаях приращение фильтрационного расхода за счет деформаций примерно одинаковое.

Наконец, до сих пор остается неизученным вопрос о собственной динамике деформаций. В соответствии с предварительными данными работы [3] при приложении к скелету грунта большой фильтрационной силы переориентация его частиц происходит не мгновенно, а постепенно, причем

характерное время этого процесса сопоставимо с длительностью циклов осушения и увлажнения в экспериментах. Однако в настоящее время проанализировать динамический фактор не представляется возможным ввиду отсутствия подходящей эмпирической информации.

ВЫВОДЫ

Массовая переориентация частиц скелета несвязного грунта в условиях плоской безнапорной и напорной фильтрации может приводить к серьезному снижению гидравлического сопротивления, а значит соответствующему увеличению коэффициента фильтрации в области деформаций. Особо благоприятные условия для развития таких фильтрационных деформаций время от времени возникают в грунтах и становятся причиной того, что уже на ранней стадии интенсивного фильтрационного процесса практически заканчивается образование указанной области. Эффект же от них намного превосходит аналогичный эффект в случае плавной и длительной совместной трансформации фильтрационного режима и физико-механического состояния грунта. Поэтому для полного учета деформационного эффекта

в инженерных приложениях целесообразно опираться на математические модели существенно нестационарной фильтрации.

1. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917 – 1967. – М.: Наука, 1969. – 548 с.
2. McDowell L.M., Hunt J.R., Sitar N. Particle transport through porous media // Water Resour. Res. – 1986. – 22, №3. – P. 1901–1921.
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: Изд-во РГТУ, 2002. – 145 с.
4. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 250 с.
5. Поляков В.Л. Установившийся приток к дренажу в несвязном грунте с локально упорядоченной структурой // Доп.НАН України. – 2013. – № 2. – С. 57–64.
6. Сидор В.Б. Порівняльний аналіз значущості суфозійного та фільтраційного процесів при функціонуванні різних типів дренажу // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. КНУБА. – 2005. – Вип.4. – С. 120–128.
7. Поляков В.Л. К оценке эффекта упорядочения структуры несвязного гранта при неустановившейся напорной плоской фильтрации // Доп.НАН України. – 2014. – №2. – С. 63–71.
8. Іващенко А.П. Фізичне та математичне моделювання процесів деформацій ґрунту в навіколдренній зоні // Вісник УДАВГ. – Рівне. – 1998. – Вип. 1. – Ч. 2. – С. 31–35.
9. Хлапук М.М. Математичне моделювання взаємодіючих процесів фільтрації і механічної суфозії // Вісник УДАВГ. – Рівне, 1997. – Вип.1, ч.2. Гідротехнічне будівництво. – С. 66–69.
10. Желизко В.В. Плоская установившаяся напорная фильтрация в несвязном несупфозионном грунте // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2010. – Вип. 13. – С. 143–147.
11. Поляков В.Л., Желизко В.В. О некоторых общих подходах к расчетам дренажа в несвязных грунтах // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – Вип. 68. – С. 126–131.