

УДК 532.546

## ОБ ОБОБЩЕННОМ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ДЕЙСТВИЕ ДРЕНАЖА

В. Л. ПОЛЯКОВ

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев**Получено 23.11.2009*

Разработана методика расчета компонент общего фильтрационного сопротивления дренажа, обусловленных фильтрационными деформациями двух типов в несвязных грунтах. При этом учтено действие дренажного фильтра, особенности формирования режимов осушения и увлажнения, структуры области деформаций. Оценено влияние на указанные компоненты важнейших фильтрационных и деформационных параметров.

Розроблено методику розрахунку компонент загального фільтраційного опору дренажу, які зумовлені фільтраційними деформаціями двох типів у незв'язних ґрунтах. При цьому враховано дію дренажного фільтра, особливості формування режимів осушення і зволоження, структури області деформацій. Виконано оцінку впливу на вказані компоненти основних фільтраційних і деформаційних параметрів.

A technique has been developed of calculating general resistance components due to filtration deformations of two types. Drain filter, characteristic properties of drainage and wetting conditions, deformation field structure have been taken into account. Analysis of main hydraulic and deformation parameters effect has been carried out on the above components.

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация фильтрационных процессов в грунтах с непрочной структурой нередко обуславливает изменение их водно-физических свойств, то есть фильтрационные деформации. Важнейшим признаком таких деформаций является изменение проницаемости грунта. При этом коэффициент фильтрации может и возрасть, и уменьшаться, а фильтрационная картина подчас существенно трансформируется. Чаще всего подобные деформации возникают в несвязных грунтах при устройстве в них различных дренажей, которые и в настоящее время остаются основным средством управления потоками грунтовых и подземных вод. Вообще строительство дренажа вносит весьма значительные, но локальные возмущения в естественный водный режим. Таким образом, в придренной зоне обычно резко возрастают скорость фильтрации, гидродинамическая сила, потери напора. Тем самым создаются водно-физические предпосылки для фильтрационных деформаций. Вместе с тем, для деформирования грунта фильтрационным потоком необходимо существование и физико-механических предпосылок. Такими являются слабое сцепление между твердыми частицами (несвязность), наличие мелких фракций, не участвующих в формировании структуры среды, нерегулярная форма структурных частиц. В зависимости от характера деформаций целесообразно выделить два их типа. К первому относятся

механические суффозия и кольматация [1 – 4]. В этом случае фильтрационный процесс сопровождается мобилизацией или иммобилизацией суффозионных частиц. Последующее их поведение тесно связано с функциональным назначением дренажа и может приводить к прямо противоположным результатам. Если дрены работают в качестве водоприемника, то большая часть частиц из области деформаций (участок грунта, подвергшийся суффозии) выносятся в них (внешняя суффозия) и создается опасность заиления самих дренажей и водоотводящих сетей. При внешней суффозии деформации имеют и положительную, и отрицательную сторону. Если же дрены являются источниками воды (подпочвенное увлажнение), то мобилизованные частицы оттесняются вглубь грунта с образованием слабопроницаемой прослойки (внутренняя суффозия) [5, 6]. Поэтому такая разновидность деформаций может серьезно затруднить действие дренажа и, естественно, очень нежелательна. Первый тип деформаций всесторонне изучался на протяжении ряда десятилетий. Значительно меньше внимания было уделено второму типу фильтрационных деформаций, заключающемуся в переориентации частиц скелета неправильной формы вдоль фильтрационного течения. Хотя он известен уже давно [7], его систематические исследования начались только в последнее время [8, 9]. В ходе специально организованных опытов с модельными грунтами в лабораторных условиях выяснилось, что вследствие минимизации сопро-

тивления движению жидкости со стороны твердой фазы возможно значимое увеличение проницаемости грунта и, как следствие, сопоставимое с ним усиление действия дренажа.

Разнообразие условий, в которых вынуждены работать дренажи, специфические особенности различных типов фильтрационных деформаций потребовали проведения их углубленных теоретических исследований. Важно подчеркнуть, что в основе разработанной теории фильтрационных деформаций лежат многочисленные эмпирические данные о характерных скоростях и градиентах, связи между ключевыми деформационными и фильтрационными характеристиками, что обеспечило достоверность базовых математических моделей и результатов их реализации аналитическими и численными методами. Приходится, однако, констатировать, что в силу сложности указанных моделей, их решений непосредственное использование полученных теоретических зависимостей в приложениях затруднительно. Существенно же его облегчить удастся, воспользовавшись концепцией фильтрационных сопротивлений и основанным на ней методом с одноименным названием, который оказался очень продуктивным при разработке инженерных методов расчета параметров фильтрационного режима и дренажа [10, 11]. Указанные сопротивления отражают вклад тех или иных неблагоприятных факторов в снижение эффективности дренажа и вводятся, опираясь на обобщенные представления для дренажного расхода. В частности, для трубчатого дренажа и осесимметричной фильтрации таким может быть выражение

$$q = 2\pi k_0 \frac{\Delta h}{\Phi_0 + \Phi_a}, \quad (1)$$

где  $q$  – удельный расход дрены (на единицу ее длины);  $k_0$  – коэффициент фильтрации исходного грунта;  $\Delta h$  – потери напора в области движения;  $\Phi_0$  – сопротивление дрены при особо благоприятных условиях ее действия (совершенная в недеформированном грунте);  $\Phi_a$  – дополнительное и также безразмерное сопротивление, обусловленное осложнением притока к дрене (ее несовершенством). Основным достоинством такого подхода является возможность независимого учета различных по своей природе факторов. При этом их взаимным влиянием пренебрегают, что, как правило, оправдано. Традиционно общее сопротивление  $\Phi$  включает две компоненты  $\Phi_h$ ,  $\Phi_x$ , которые характеризуют гидродинамическое и конструктивное несовершенство и возникают из-за дополнительного сжатия потока сначала при прибли-

жении к дрене, а затем и при входе в водоприемные элементы (отверстия, щели). Многочисленные формулы для  $\Phi_h$ ,  $\Phi_x$  представлены в литературе, например [12 – 14]. Фильтрационные деформации за исключением внутренней суффозии нельзя отнести к факторам, ухудшающим условия работы дренажа, и поэтому они не вписываются в рамки традиционного понимания сопротивления  $\Phi$ . Однако эти рамки можно формально раздвинуть, вводя специальные сопротивления опять-таки на основе (1) так, чтобы они адекватно отражали изменение дренажного расхода в связи с деформациями. Очевидно, что новые сопротивления чаще всего должны иметь отрицательный знак. Итак, для фильтрационного сопротивления  $\Phi$  предлагается следующее обобщение:

$$\Phi = \Phi_h + \Phi_x + \Phi_f + \Phi_r, \quad (2)$$

где  $\Phi_f$ ,  $\Phi_r$  – компоненты, обусловленные фильтрационными деформациями первого и второго типов соответственно. Отличительной особенностью деформаций, по крайней мере первого типа, является сравнительно высокая скорость их протекания [15] (вопрос о характерном времени деформаций второго типа пока остается открытым). Поэтому при современном, весьма ограниченном знании о фильтрационных деформациях целесообразно рассчитывать деформационные компоненты сопротивления  $\Phi$ , базируясь на имеющихся строгих решениях подходящих задач дренажа для экстремальных условий (исходя, например, из максимальных значений модуля дренажного стока [16, 17]). На стадии проектирования дренажных систем в несвязных грунтах подобную информацию часто удается получить с участков-аналогов, находящихся в сходных почвенно-климатических условиях.

Немаловажную роль в действии дренажа и деформировании при этом грунта играет дренажный фильтр [18, 19]. Имея высокую проницаемость, даже при сравнительно малой толщине он способен заметно уменьшить градиенты напора вблизи дрены и тем самым ослабить деформации или вообще их предотвратить, что, кстати, в несуффозионных грунтах нежелательно. Поэтому ввиду широкого применения фильтров при регулировании водного режима несвязных грунтов они учитывались во всех приведенных расчетных формулах. Принципиальные различия в работе осушительного и увлажнительного дренажа накладывают свой отпечаток на общую величину  $\Phi$  и ее составляющие, в частности, связанные с деформациями. Поэтому  $\Phi_f$ ,  $\Phi_r$  определялись для условий осушения и увлажнения грунтов раздельно.

### 1. РЕЖИМ ОСУШЕНИЯ

Пусть приток воды к трубчатой дрене происходит из сильно переувлажненного грунта с удельным (на погонный метр) расходом  $q_m$ . При фильтрационных деформациях первого типа согласно ранее проведенным исследованиям [20, 21] в области деформаций в конце концов сохраняется ничтожно малый объем суффозионных частиц, что дает право при установлении  $\Phi_f$  пренебрегать им. Тогда потери напора в области движения будут примерно

$$\Phi_{fa} = \left( \frac{1}{\bar{k}_f} - \frac{1}{\bar{k}_e} \right) \ln \bar{R}_f + \frac{1 - \bar{k}_e}{\bar{k}_e} \ln \bar{R}_*. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{k}_f = k_f/k_0$ ,  $\bar{k}_e = k_e/k_0$ ,  $k_f, k_e$  – коэффициенты фильтрации фильтра и зоны полной деформации (после удаления из нее всех суффозионных частиц);  $\bar{R}_f = R_f/R_d$ ,  $R_f, R_d$  – радиусы фильтра и дрены;  $\bar{R}_* = R_*/R_d$ ,  $R_* = q_m/(2\pi u_k(1 - m_s - m_0))$ ,  $q_m$  предлагается трактовать как максимальный за период эксплуатации расход дрены, обуславливающий фактическое физико-механическое состояние грунта;  $m_s, m_0$  – доли общего пространства, занятые структурными и первоначально суффозионными частицами.

Для определения в выражении (2) компоненты  $\Phi_r$  формируется математическая задача осесимметричной установившейся фильтрации в области движения, образованной фильтром, областью деформаций и зоной недеформированного грунта. При этом область деформаций может состоять или из двух зон (полной и частичной деформации), или из одной (частичной деформации). В первом случае исходная система уравнений фильтрации включает

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dh_j}{dr} \right) = 0, \quad j = f, u, 0; \quad (4)$$

$$\frac{d}{dr} \left[ r k_I(r) \frac{dh_I}{dr} \right] = 0, \quad R_u \leq r \leq R_k, \quad (5)$$

где  $h_f, h_u, h_I, h_0$  – напоры в фильтре, зонах полной, частичной деформации и недеформированного грунта; коэффициент фильтрации в зоне частичной деформации согласно [22] будет

$$k_I(r) = \frac{a}{2} + \sqrt{\left( \frac{a}{2} \right)^2 + \frac{bq_m}{2\pi r}}, \quad (6)$$

где  $a, b$  – эмпирические коэффициенты, выражаемые через предельные коэффициент фильтрации  $k_u$ , градиент  $I_u$  и критический градиент  $I_k$  следующим образом [23]:

$$a = 1 - \frac{k_u - k_0}{I_u - I_k} I_k, \quad b = \frac{k_u - k_0}{I_u - I_k},$$

$R_u, R_k$  – радиусы границ между зонами полной (первая) и частичной (вторая) деформаций, а также второй и третьей (недеформированного грунта), определяемые как [22]

$$R_u = \frac{q_m}{2\pi k_u I_u}, \quad R_k = \frac{q_m}{2\pi k_0 I_k}. \quad (7)$$

На дрене задаются условия

$$r = R_d, \quad 2\pi k_f R_d \frac{dh_f}{dr} = q_m; \quad h_f = H_d. \quad (8)$$

Следует заметить, что вид условий (8) для нахождения  $\Phi_r$  не имеет принципиального значения. На внутренних границах задаются условия сопряжения напоров и расходов:

$$r = R_f, \quad h_f = h_u; \quad k_f \frac{dh_f}{dr} = k_u \frac{dh_u}{dr}; \quad (9)$$

$$r = R_u, \quad h_u = h_I; \quad \frac{dh_u}{dr} = \frac{dh_I}{dr}; \quad (10)$$

$$r = R_k, \quad h_I = h_0; \quad \frac{dh_I}{dr} = \frac{dh_0}{dr}. \quad (11)$$

В результате решения задачи (4), (5), (8) – (11) для потерь напора  $\Delta h$  получено выражение

$$\Delta h = \frac{q_m}{2\pi} \left( \frac{1}{k_f} \ln \frac{R_f}{R_d} + \frac{1}{k_u} \ln \frac{R_u}{R_f} + \int_{R_u}^{R_k} \frac{dr}{r k_I(r)} + \frac{1}{k_0} \ln \frac{R}{R_k} \right). \quad (12)$$

Исходя из (1) и с учетом (12) для компоненты  $\Phi_r$  в случае осевой симметрии выведена обобщенная формула

$$\Phi_{ra} = \frac{1}{k_f} \ln \bar{R}_f + \frac{1}{k_u} \ln \frac{\bar{R}_u}{\bar{R}_f} + \int_{\bar{R}_u}^{\bar{R}_k} \frac{d\bar{r}}{\bar{r} \bar{k}_I(\bar{r})} - \ln \bar{R}_k, \quad (13)$$

где

$$\bar{k}_I = \frac{k_I}{k_0}, \quad \bar{k}_u = \frac{k_u}{k_0}, \quad \bar{R}_{u,k} = \frac{R_{u,k}}{R_d},$$

$$\bar{k}_I(\bar{r}) = \frac{\bar{a}}{2} + \sqrt{\left( \frac{\bar{a}}{2} \right)^2 + \frac{\bar{b}\bar{q}_m}{\bar{r}}}, \quad \bar{a} = \frac{a}{k_0}, \quad \bar{b} = \frac{bI_0}{k_0}.$$

Чтобы придать формуле (13) конкретный и более удобный для практического использования вид, вводится безразмерный расход  $\bar{q}_m = q_m/(2\pi k_0 I_0 R_d)$  и вычисляется содержащийся в ней интеграл

$$Y_{a1}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k) = \int_{\bar{R}_u}^{\bar{R}_k} \frac{d\bar{r}}{\bar{r} \bar{k}_I(\bar{r})} = \frac{\bar{a}}{2\bar{b}} \left( \frac{1}{\bar{k}_u \bar{I}_u} - \frac{1}{\bar{I}_k} \right) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2\bar{b}} \left( \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{\bar{I}_k}\right)^2 + \frac{4\bar{b}}{\bar{I}_k}} - \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{\bar{k}_u \bar{I}_u}\right)^2 + \frac{4\bar{b}}{\bar{k}_u \bar{I}_u}} \right) + \\
 & + \frac{2}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}\bar{I}_k}}{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}\bar{k}_u \bar{I}_u}} + \frac{1}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{k}_u \bar{I}_u}{\bar{I}_k}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Итак, окончательная формула для  $\Phi_{ra}$  будет

$$\begin{aligned}
 \Phi_{ra} = \frac{1}{k_f} \ln \bar{R}_f + \frac{1}{k_u} \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{k}_u \bar{I}_u} - \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k} + \quad (15) \\
 + Y_{a1}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k).
 \end{aligned}$$

В выражении для  $\bar{q}_m$  и далее  $I_0$  следует понимать как некоторый стандартный градиент напора, который целесообразно выбирать исходя из конкретных условий исходной задачи. В данном случае существует ряд равноценных способов выбора масштаба для градиентов. Например, в качестве  $I_0$  можно взять  $q_m/(2\pi R_d k_u)$ , что при отсутствии фильтра и наличии в грунте предельных деформаций отвечает максимальному в области движения градиенту (на дрене). Тогда  $\bar{q}_m = \bar{k}_u$  и, следовательно, формула (15) станет

$$\Phi_{ra} = \frac{1}{k_f} \ln \bar{R}_f - \frac{1}{k_u} \ln \bar{I}_u - \ln \frac{\bar{k}_u}{\bar{I}_k} + Y_{a1}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k).$$

Другой вариант – использовать для нормировки градиентов  $I_u$ . При этом относительные градиенты в зоне предельной деформации превысят 1, а в других характерных зонах будут меньше 1. В такой ситуации

$$\bar{I}_u = 1, \quad \bar{q}_m = \frac{q_m}{2\pi k_0 I_u R_d},$$

так что

$$\Phi_{ra} = \frac{1}{k_f} \ln \bar{R}_f + \frac{1}{k_u} \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{k}_u} - \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k} + Y_{a1}(\bar{k}_u, 1, \bar{I}_k).$$

В целом выбор  $I_0$  не имеет принципиального значения и никак не отражается на достоверности конечных результатов, величине размерных характеристик.

Формула (15) пригодна для вычисления только при наличии зоны предельной деформации, что обеспечивается выполнением условия

$$\bar{q}_m > \bar{k}_u \bar{I}_u \bar{R}_f. \quad (16)$$

Если же справедливо условие

$$\bar{k}_u \bar{I}_u \bar{R}_f > \bar{q}_m > \bar{I}_k \bar{R}_f, \quad (17)$$

то происходят исключительно частичные деформации. Тогда математическая модель заметно

упрощается, так как выпадают второе из уравнений (4), условия (10). Из ее решения вытекает, что потери напора в области движения составят

$$\Delta h = \frac{q_m}{2\pi} \left( \frac{1}{k_f} \ln \frac{R_f}{R_d} + \int_{R_f}^{R_k} \frac{dr}{rk_I(r)} + \frac{1}{k_0} \ln \frac{R}{R_k} \right) \quad (18)$$

и в соответствии с (1) и (18)  $\Phi_{ra}$  предлагается рассчитывать по формуле

$$\Phi_{ra} = \frac{1}{k_f} \ln \bar{R}_f - \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k} + Y_{a2}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k, \bar{q}_m), \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned}
 Y_{a2}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k) = \frac{\bar{a}}{2\bar{b}} \left( \frac{\bar{R}_f}{\bar{q}_m} - \frac{1}{\bar{I}_k} \right) + \\
 + \frac{1}{2\bar{b}} \left( \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{\bar{I}_k}\right)^2 + \frac{4\bar{b}}{\bar{I}_k}} - \sqrt{\left(\frac{\bar{a}\bar{R}_f}{\bar{q}_m}\right)^2 + \frac{4\bar{b}\bar{R}_f}{\bar{q}_m}} \right) + \\
 + \frac{2}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{a} + \sqrt{\bar{a}^2 + 4\bar{b}\bar{I}_k}}{\bar{a}\sqrt{\bar{R}_f} + \sqrt{\bar{a}^2 \bar{R}_f + 4\bar{b}\bar{q}_m}} + \frac{1}{\bar{a}} \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k}. \quad (20)
 \end{aligned}$$

Несложно убедиться, что выражение (20) совпадает с (14), если положить  $\bar{q}_m = \bar{k}_u \bar{I}_u \bar{R}_f$ . Естественно, что  $\Phi_{ra}$  стремится к 0 по мере приближения  $\bar{q}_m$  к  $\bar{I}_k \bar{R}_f$ .

Далее рассматривается радиальная фильтрация к малому водоприемному элементу (стоку) с максимальным за время эксплуатации расходом  $Q_m$ . Такая ситуация складывается при притоке воды к фильтру скважины относительно малых размеров, щелям между трубками гончарных дрен и пр. Тогда в случае деформаций первого типа потери напора в области движения приближенно (сопротивление сохранившихся в зоне частичной деформации суффuzionных частиц считается пренебрежимо малым) будут

$$\begin{aligned}
 \Delta h \simeq \frac{Q_m}{4\pi} \left[ \frac{1}{k_f} \left( \frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_f} \right) + \frac{1}{k_e} \left( \frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_0} \right) + \right. \\
 \left. + \frac{1}{k_0} \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right) \right]. \quad (21)
 \end{aligned}$$

По аналогии с (1) расход несовершенного водоприемного элемента представляется в виде

$$Q = 4\pi k_0 \frac{\Delta h}{\Phi_0 + \Phi_r}. \quad (22)$$

Принимая во внимание формулу (21) и выражение

$$\Phi_0 = \frac{1}{R_d} - \frac{1}{R},$$

из представления для расхода (22) получено

$$\bar{\Phi}_{fr} = R_d \Phi_{fr} = \frac{1}{\bar{R}_*} - 1 + \frac{1}{\bar{k}_f} \left( 1 - \frac{1}{\bar{R}_f} \right) + \frac{1}{\bar{k}_e} \left( \frac{1}{\bar{R}_f} - \frac{1}{\bar{R}_*} \right), \quad (23)$$

где

$$\bar{R}_* = \sqrt{\frac{Q_m}{4\pi u_k(1 - m_s - m_0)R_d^2}}.$$

При деформациях второго типа и присутствии в области движения кроме фильтра трех характерных зон полные потери напора составят

$$\Delta h = \frac{Q_m}{4\pi} \left[ \frac{1}{\bar{k}_f} \left( \frac{1}{\bar{R}_d} - \frac{1}{\bar{R}_f} \right) + \frac{1}{\bar{k}_u} \left( \frac{1}{\bar{R}_f} - \frac{1}{\bar{R}_u} \right) + \int_{\bar{R}_u}^{\bar{R}_k} \frac{dr}{r^2 \bar{k}_I(r)} + \frac{1}{\bar{k}_0} \left( \frac{1}{\bar{R}_k} - \frac{1}{\bar{R}} \right) \right]. \quad (24)$$

Тогда в соответствии с выражениями (22), (24) для сопротивления  $\bar{\Phi}_{rr} = R_d \Phi_{rr}$  выведена формула

$$\bar{\Phi}_{rr} = R_d \Phi_{rr} = \frac{1}{\bar{k}_f} \left( 1 - \frac{1}{\bar{R}_f} \right) + \frac{1}{\bar{k}_u} \left( \frac{1}{\bar{R}_f} - \frac{1}{\bar{R}_u} \right) + \int_{\bar{R}_u}^{\bar{R}_k} \frac{d\bar{r}}{\bar{r}^2 \bar{k}_I(\bar{r})} + \frac{1}{\bar{R}_k} - 1.$$

Учитывая, что [см. 24]

$$\bar{R}_u = \sqrt{\frac{\bar{Q}_m}{\bar{k}_u \bar{I}_u}}, \quad \bar{R}_k = \sqrt{\frac{\bar{Q}_m}{\bar{I}_k}}, \quad \bar{Q}_m = \frac{Q_m}{4\pi k_0 I_0 R_d^2},$$

$$\bar{k}_I(\bar{r}) = \frac{\bar{a}}{2} + \sqrt{\frac{\bar{a}^2}{4} + \frac{\bar{b}\bar{Q}_m}{\bar{r}^2}}, \quad \bar{a} = \frac{a}{k_0}, \quad \bar{b} = \frac{I_0 b}{k_0},$$

для  $\bar{\Phi}_{rr}$  окончательно рекомендуется формула

$$\bar{\Phi}_{rr} = \frac{1}{\bar{k}_f} \left( 1 - \frac{1}{\bar{R}_f} \right) + \frac{1}{\bar{k}_u} \left( \frac{1}{\bar{R}_f} - \sqrt{\frac{\bar{k}_u \bar{I}_u}{\bar{Q}_m}} \right) + \sqrt{\frac{\bar{I}_k}{\bar{Q}_m}} - 1 + Y_{r1}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k, \bar{Q}_m). \quad (25)$$

Здесь

$$Y_{r1}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k) = \frac{\bar{a}}{2\bar{b}\sqrt{\bar{Q}_m}} \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{k}_u \bar{I}_u}} - \frac{1}{\sqrt{\bar{I}_k}} \right) + \frac{1}{\sqrt{\bar{b}\bar{Q}_m}} \left( \sqrt{1 + \frac{\bar{a}^2}{4\bar{b}\bar{I}_k}} - \sqrt{1 + \frac{\bar{a}^2}{4\bar{b}\bar{k}_u \bar{I}_u}} \right) + \ln \frac{\sqrt{4\bar{b}\bar{k}_u \bar{I}_u} + \sqrt{4\bar{b}\bar{k}_u \bar{I}_u + \bar{a}^2 \bar{Q}_m}}{\sqrt{4\bar{b}\bar{I}_k} + \sqrt{4\bar{b}\bar{I}_k + \bar{a}^2 \bar{Q}_m}}.$$

Условием существования предельных деформаций является

$$\bar{Q}_m > \bar{k}_u \bar{I}_u \bar{R}_f^2. \quad (26)$$

Если же относительный дренажный расход находится в пределах

$$\bar{k}_u \bar{I}_u \bar{R}_f^2 > \bar{Q}_m > \bar{I}_k \bar{R}_f^2, \quad (27)$$

то предельная степень деформаций не достигается и расчетная формула для  $\bar{\Phi}_{rr}$  трансформируется к виду

$$\bar{\Phi}_{rr} = \frac{1}{\bar{k}_f} \left( 1 - \frac{1}{\bar{R}_f} \right) + \sqrt{\frac{\bar{I}_k}{\bar{Q}_m}} - 1 + Y_{r2}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k, \bar{Q}_m), \quad (28)$$

где

$$Y_{r2}(\bar{k}_u, \bar{I}_u, \bar{I}_k) = \frac{\bar{a}}{2\bar{b}\sqrt{\bar{Q}_m}} \left( \frac{\bar{R}_f}{\sqrt{\bar{Q}_m}} - \frac{1}{\sqrt{\bar{I}_k}} \right) + \frac{1}{\sqrt{\bar{b}\bar{Q}_m}} \left( \sqrt{1 + \frac{\bar{a}^2}{4\bar{b}\bar{I}_k}} - \sqrt{1 + \frac{\bar{a}^2 \bar{R}_f^2}{4\bar{b}\bar{Q}_m}} \right) + \ln \frac{\sqrt{\bar{Q}_m}(\sqrt{4\bar{b}} + \sqrt{4\bar{b} + \bar{a}^2 \bar{R}_f^2})}{\bar{R}_f(\sqrt{4\bar{b}\bar{I}_k} + \sqrt{4\bar{b}\bar{I}_k + \bar{a}^2 \bar{Q}_m})}.$$

Если через  $\bar{\Phi}_{rr}$  выразить  $\Phi_{ra}$ , то в последующих расчетах дренажа неравномерность притока воды к нему можно не принимать во внимание.

## 2. РЕЖИМ УВЛАЖНЕНИЯ

При работе дрен в качестве водоисточников влияние фильтрационных деформаций на насыщенное течение грунтовых и подземных вод в несвязных суффозионных грунтах может стать особенно существенным. Оттесненные от дрены мобилизованные мелкие частицы накапливаются в прослое, проницаемость которого в результате оказывается заметно меньше, чем проницаемость окружающего грунта. Строго говоря, принесенные в прослой неструктурные частицы распределяются неравномерно. Но в первом приближении оправдано принимать как раз их равномерное распределение. Теоретическое исследование действия

дрен-увлажнителей в таких несколько упрощенных условиях проведено в работе [5], а его результаты используются ниже при установлении сопротивлений  $\Phi_{fr}$ ,  $\Phi_{fa}$ . Таким образом, область фильтрации при наличии дренажного фильтра содержит четыре составных части – фильтр: зону полной деформации с напором  $h_e$ , коэффициентом фильтрации  $k_e$  ( $R_f < r \leq R_e$ ,  $R_e$  – внешний радиус зоны); зону осажденных частиц с  $h_p$ ,  $k_p$  ( $R_e < r \leq R_*$ ,  $R_*$  – внешний радиус зоны); зону недеформированного грунта с  $h_0$ ,  $k_0$ . В случае осесимметричной фильтрации исходные уравнения имеют обычный вид (4). Оператор граничных условий совпадает с (8) – (11), причем под  $H_d$  понимается повышенный напор, который специально создается для обеспечения интенсивного поступления воды в грунт. Промежуточные выкладки опускаются. Потери напора в области движения характеризуются выражением

$$\Delta h = \frac{q_w}{2\pi} \left[ \ln \frac{R_f}{R_d} + \frac{1}{k_e} \ln \frac{R_e}{R_f} + \frac{1}{k_p} \ln \frac{R_*}{R_e} + \frac{1}{k_0} \ln \frac{R}{R_*} \right]. \quad (29)$$

Тогда в соответствии с формулами (1) и (29)

$$\Phi_{fa} = \frac{1}{k_f} \ln \bar{R}_f + \frac{1}{k_e} \ln \frac{\bar{R}_e}{\bar{R}_f} + \frac{1}{k_p} \ln \frac{\bar{R}_*}{\bar{R}_e} - \ln \bar{R}_*. \quad (30)$$

Здесь согласно [5]

$$\bar{R}_e = \frac{R_e}{R_d} = \sqrt{\frac{(1 - n_c - \beta)\bar{R}_*^2 + \beta}{1 - n_c}},$$

$n_c$  – пористость сложенной из суффозионных частиц среды (вторичная пористость),  $\beta = m_0/(1 - m_s)$ .

При подаче воды в несущий грунт с помощью трубчатой дрены напор по мере удаления от нее убывает, но характер изменения напора в режимах осушения и увлажнения сходный. Поэтому отвечающие им выражения для потерь напора имеют одинаковый вид, а именно (12) или (18) за исключением дренажных расходов  $q_m$ ,  $q_w$ , которые, как правило, заметно отличаются. Итак, компоненту  $\Phi_{ra}$  оправдано в зависимости от условий (16), (17) вычислять или по формуле (15), или по (19), предварительно заменив в них  $\bar{q}_m$  на  $\bar{q}_w$ .

Радиальная фильтрация с расходом  $Q_w$  от малого внутреннего источника вглубь суффозионного грунта приводит с учетом механической суффозии к следующим потерям напора в области движения:

$$\Delta h = \frac{Q_w}{4\pi} \left[ \frac{1}{k_f} \left( \frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_f} \right) + \frac{1}{k_e} \left( \frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_e} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{k_p} \left( \frac{1}{R_e} - \frac{1}{R_*} \right) + \frac{1}{k_0} \left( \frac{1}{R_*} - \frac{1}{R} \right) \right], \quad (31)$$

так что в соответствии с выражением (22) компонента  $\Phi_{fr}$  будет

$$\bar{\Phi}_{fr} = \frac{1}{k_f} \left( 1 - \frac{1}{\bar{R}_f} \right) + \frac{1}{k_e} \left( \frac{1}{\bar{R}_f} - \frac{1}{\bar{R}_e} \right) + \frac{1}{k_p} \left( \frac{1}{\bar{R}_e} - \frac{1}{\bar{R}_*} \right) + \frac{1}{\bar{R}_*} - 1. \quad (32)$$

Здесь согласно [5]

$$\bar{R}_e = \left( \frac{(1 - n_c - \beta)\bar{R}_*^3 + \beta}{1 - n_c} \right)^{2/3}.$$

Наконец компоненту  $\bar{\Phi}_{rr}$ , служащую мерой влияния деформаций второго типа на действие дренажа, можно находить с учетом условий (26), (27) по формулам (25) или (28).

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Количественный анализ компонент  $\Phi_{fj}$ ,  $\Phi_{rj}$  ( $j = a, r$ ) общего сопротивления  $\Phi$  базировался на результатах расчетов множества примеров и преследовал две цели: проиллюстрировать предложенные формулы и условия их применения; оценить значимость основных модельных параметров для указанных компонент. Внимание акцентировалось на безразмерных абсолютных величинах  $|\Phi_{ra}|$ ,  $|\Phi_{rr}|$  ввиду большей сложности их определения. Параметры, характеризующие особенности деформирования несвязных грунтов и интенсивность фильтрационного процесса, изменялись дискретно или непрерывно в широких пределах.

В первую очередь изучалась роль дренажного фильтра в повышении интенсивности отвода воды из несвязных грунтов, подвергшихся фильтрационным деформациям обоих типов. При этом был выделен его вклад в  $|\Phi_{fa}|$ ,  $|\Phi_{ra}|$ , рассчитанный по формулам (3), (15) при фиксированных значениях  $\bar{k}_f$  (5, 10, 20),  $\bar{R}_*$  (5, 10),  $\bar{q}_m$  (5, 10). В качестве аргумента здесь выступила относительная толщина фильтра, которая изменялась в пределах от 1 (фильтр отсутствует) до 3. Данные расчетов изображены на рис. 1, 2 и свидетельствуют о более сильном влиянии на  $|\Phi_{ja}|$  ( $j = f, r$ ), а значит и на дренажный расход параметра  $\bar{R}_f$ . Действительно, получено примерное приращение  $|\Phi_{fa}|$  на 42%, 25% и 12% за счет трехкратного увеличения  $\bar{R}_f$ , четырехкратного –  $\bar{k}_f$  и двухкратного –  $\bar{R}_*$  соответственно. В целом можно сделать вывод о приоритетном значении механической суффозии и

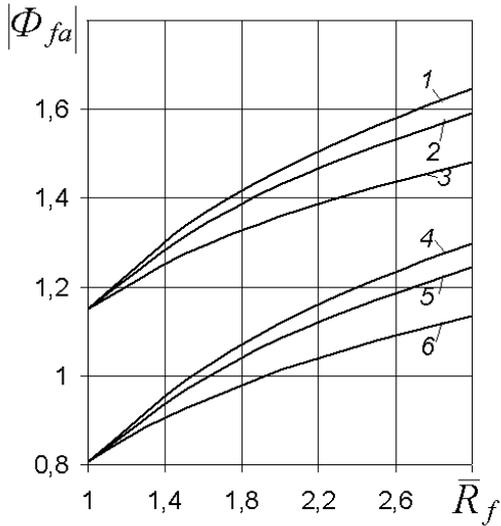


Рис. 1. Графики зависимостей  $|\Phi_{fa}|(\bar{R}_f)$ :  
 1 – 3 –  $\bar{R}_{0m} = 10$ ; 4 – 6 –  $\bar{R}_{0m} = 5$ ;  
 1, 4 –  $\bar{k}_f = 20$ ; 2, 5 –  $\bar{k}_f = 10$ , 3, 6 –  $\bar{k}_f = 5$

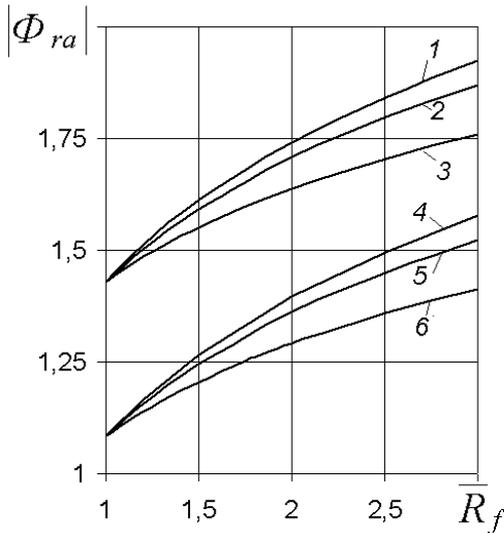


Рис. 2. Графики зависимостей  $|\Phi_{ra}|(\bar{R}_f)$ :  
 1 – 3 –  $\bar{q}_m = 10$ ; 4 – 6 –  $\bar{q}_m = 5$ ;  
 1, 4 –  $\bar{k}_f = 20$ ; 2, 5 –  $\bar{k}_f = 10$ , 3, 6 –  $\bar{k}_f = 5$

переориентации частиц скелета для работы дрен в режиме осушения при принятых для параметров фильтров диапазонах их значений. Поэтому в последующем, чтобы не переусложнять анализ, фильтр не рассматривался.

В ходе расчетов  $\Phi_{ra}$  при определенных соотношениях между исходными параметрами возникли трудности. Легко убедиться, что при  $\bar{k}_u \bar{I}_k = \bar{I}_u$  ко-

эффициент  $\bar{a}$  обращается в 0 и в формулах (15), (19) появляется неопределенность типа 0/0. После ее раскрытия указанные формулы приобрели вид

$$\Phi_{ra} = \frac{1}{\bar{k}_u} \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{k}_u \bar{I}_u} - \ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k} + 2 \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{b} \bar{I}_k}} - \frac{1}{\sqrt{\bar{b} \bar{k}_u \bar{I}_u}} \right),$$

$$\Phi_{ra} = -\ln \frac{\bar{q}_m}{\bar{I}_k} + 2 \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{b} \bar{I}_k}} - \frac{1}{\sqrt{\bar{b} \bar{q}_m}} \right).$$

Предметом дальнейших серийных вычислений стали зависимости  $|\Phi_{rj}|$  ( $j = a, r$ ) от ключевых фильтрационных и деформационных параметров –  $q_m, Q_m; \bar{k}_u, \bar{I}_k, \bar{I}_u$ . Для них были выбраны следующие интервалы значений:  $\bar{q}_m, Q_m$  (от 0 до 20);  $\bar{k}_u$  (от 1 до 3);  $\bar{I}_k, \bar{I}_u$  (от 0 до 1.5). Сначала определялась функция  $|\Phi_{ra}(\bar{q}_m)|$  при трех значениях  $\bar{k}_u$  (1.5, 2, 3), а также  $\bar{I}_k = 0.5, \bar{I}_u = 1.5$  (рис. 3). Выбор подходящей расчетной формулы осуществлялся с помощью условий (16), (17), в частности, при  $\bar{q}_m > \bar{k}_u \bar{I}_u$  использовалась формула (15). Вычисления  $|\Phi_{ra}|$  велись от ее нулевого значения, которое достигалось согласно (17) при  $\bar{q}_m = \bar{I}_k = 0.5$  (при  $\bar{q}_m \leq \bar{I}_k$  фильтрационный поток не в состоянии инициировать деформации), до максимального на расчетном интервале при  $\bar{q}_m = 20$  (абсолютный максимум в данной серии составил 1.86). Как видно из рис. 3, с увеличением  $\bar{q}_m$  изменение компоненты  $\Phi_{ra}$  замедляется. При этом она показывает высокую чувствительность по отношению к коэффициенту  $\bar{k}_u$ , что, кстати, подтверждает и рис. 4 с графиками зависимости  $|\Phi_{ra}(\bar{k}_u)|$  теперь уже при неизменных  $\bar{q}_m$  (2, 5, 10) и прежних  $\bar{I}_k, \bar{I}_u$ . Особенно резко реагирует  $\Phi_{ra}$  на изменение  $\bar{k}_u$  в окрестности своего контрольного значения 1 (недеформированный грунт). Существенность влияния на  $\Phi_{ra}$  характерных градиентов демонстрируют рис. 5, 6. Так, увеличение  $\bar{I}_k$  в широких пределах обуславливает значительное сужение области деформаций, что находит выражение в четырехкратном уменьшении  $|\Phi_{ra}|$  (рис. 5). Аналогичная картина наблюдается и при росте  $\bar{I}_u$ , что приводит к уменьшению зоны полной деформации и в целом к ощутимому снижению степени деформированности грунта.

В заключение исследовалось поведение относительной компоненты  $\bar{\Phi}_r$  при заданных изменениях  $\bar{Q}_m$  (от  $\bar{I}_k$  до 20) и  $\bar{k}_u$  (от 1 до 3). Данные расчетов зависимости  $|\bar{\Phi}_{rr}(\bar{Q}_m)|$  представлены на рис. 7 и указывают на явные отличия в характере роста искомой величины при осесимметричной и радиальной фильтрации. Фактически изменения  $\bar{\Phi}_{rr}$  локализованы на интервале  $0 < \bar{Q}_m < 3$ , а при  $\bar{Q}_m > 5$  расчетные кривые выполаживаются,

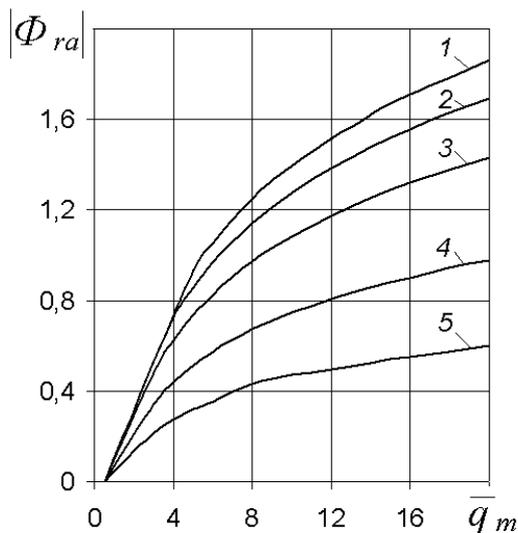


Рис. 3. Графики зависимостей  $|\Phi_{ra}|(\bar{q}_m)$ :  
 1 -  $\bar{k}_u = 3$ ; 2 -  $\bar{k}_u = 2.5$ ; 3 -  $\bar{k}_u = 2$ ;  
 4 -  $\bar{k}_u = 1.5$ ; 5 -  $\bar{k}_u = 1.25$

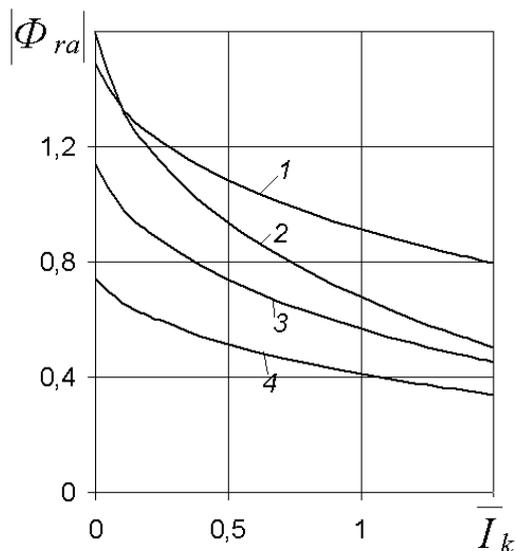


Рис. 5. Графики зависимостей  $|\Phi_{ra}|(\bar{I}_k)$ :  
 1 -  $\bar{q}_m = 10$ , 2 - 4 -  $\bar{q}_m = 5$ ;  
 2 -  $\bar{k}_u = 3$ ; 1, 3 -  $\bar{k}_u = 2$ , 4 -  $\bar{k}_u = 1.5$

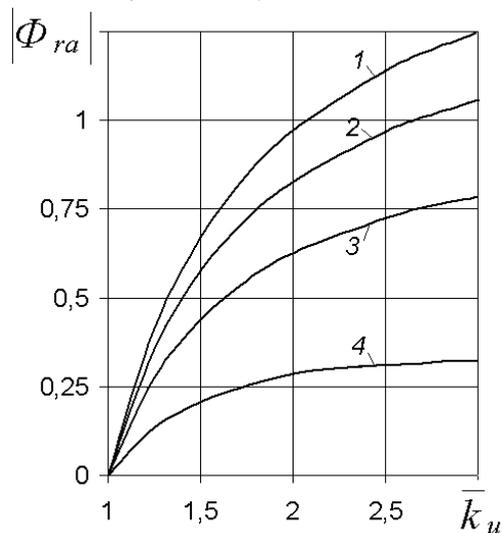


Рис. 4. Графики зависимостей  $|\Phi_{ra}|(\bar{k}_u)$ :  
 1 -  $\bar{q}_m = 8$ ; 2 -  $\bar{q}_m = 6$ ;  
 1, 4 -  $\bar{q}_m = 4$ ; 4 -  $\bar{q}_m = 2$

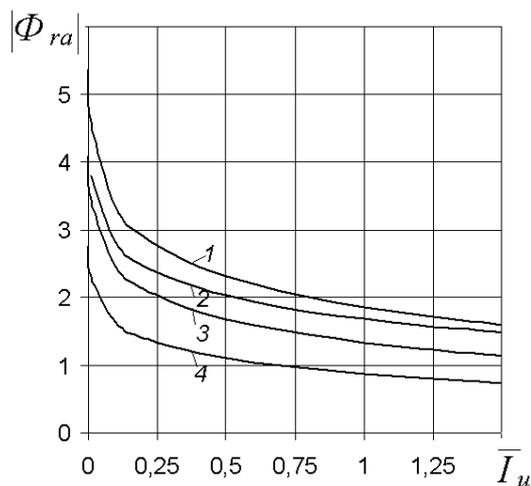


Рис. 6. Графики зависимостей  $|\Phi_{ra}|(\bar{I}_u)$ :  
 1, 3, 4 -  $\bar{q}_m = 5$ ; 2 -  $\bar{q}_m = 10$ ;  
 1 -  $\bar{k}_u = 3$ ; 2, 3 -  $\bar{k}_u = 2$ , 4 -  $\bar{k}_u = 1.5$

так что она с увеличением  $\bar{Q}_m$  почти не меняется. Вместе с тем, связь  $\Phi_r$  с коэффициентом  $\bar{k}_u$  в случае сферического (рис. 8) и линейного (рис. 4) стоков имеет подобный характер. Следует отметить, что меньшие в сравнении с  $|\Phi_{ra}|$  значения  $|\bar{\Phi}_{rr}|$  не означают малосущественность деформаций второго типа при радиальной фильтрации, так как соотношение между  $\Phi_{rr}$  и базовым фильтрационным сопротивлением  $\Phi_0$  (для совершенного сферического стока) такого же порядка, как и аналогичное

соотношение при осесимметричной фильтрации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несвязные грунты часто подвергаются фильтрационным деформациям вследствие интенсификации течения грунтовых или подземных вод при устройстве различных дренажей. Резкое увеличение градиентов напора в придренной зоне способствует мобилизации суффuzionных частиц (первый тип деформаций) и переориентации частиц

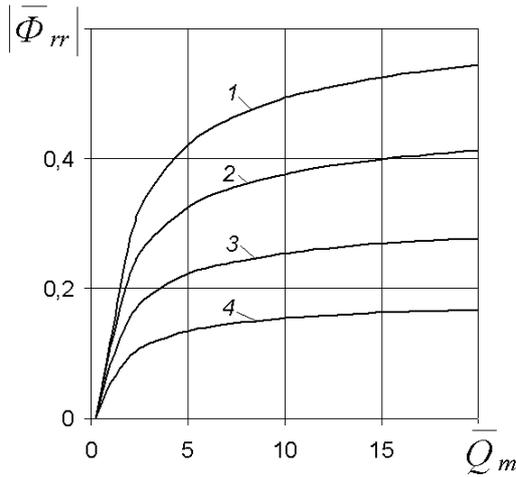


Рис. 7. Графики зависимостей  $|\Phi_{rr}|(\bar{Q}_m)$ :  
 1 –  $\bar{k}_u = 3$ ; 2 –  $\bar{k}_u = 2$ ;  
 3 –  $\bar{k}_u = 1.5$ ; 4 –  $\bar{k}_u = 1.25$

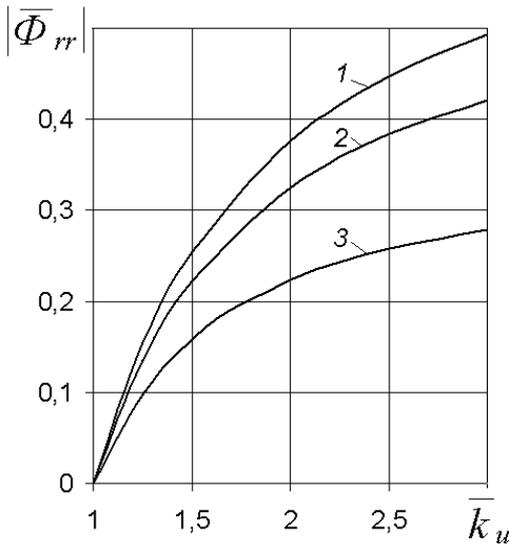


Рис. 8. Графики зависимостей  $|\Phi_{rr}|(\bar{k}_u)$ :  
 1 –  $\bar{Q}_m = 10$ ; 2 –  $\bar{Q}_m = 5$ ; 3 –  $\bar{Q}_m = 2$

скелета неправильной формы (второй тип). В результате сопротивление движению жидкости со стороны твердой фазы грунта минимизируется. Метод фильтрационных сопротивлений дает возможность сравнительно просто учитывать в расчетах дренажа различные факторы, осложняющие его работу. Мерой несовершенства условий действия дренажей служат фильтрационные сопротивления. Предложено обобщить их понятие, включив в выражение для общего сопротивления  $\Phi$  специальные составляющие, которые отражают

вклад в изменение дренажного расхода деформаций обоих типов. Разработанная методика расчета указанных составляющих учитывает влияние дренажного фильтра, а также существенные различия в формировании водного режима несвязных грунтов и их деформировании при применении дрен в качестве осушителей и увлажнителей, осесимметричной и радиальной фильтрации, различной структуре области деформаций. Таким образом становится возможным рассчитывать параметры дренажа и водного режима с помощью существующих надежных инженерных методов, например [25–26]. При этом нет необходимости в их доработке – достаточно скорректировать сопротивление  $\Phi$ , привлекая вышеупомянутую методику.

1. Кондратьев В.Н. Фильтрация и механическая суффозия в несвязных грунтах.– Симферополь: Крымиздат, 1958.– 76 с.
2. Тугай А.М., Олійник О.Я., Тугай Я.А. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу.– Харків: ХТАМГ, 2004.– 240 с.
3. Indraratna B., Radampoia S. Analysis of critical hydraulic gradient for particle movement in filtration // J.of Geotech. and Geoenviron.Eng.– 2002.– 128, N 4.– P. 347–350.
4. Ojha C.S.P., Singh V.P., Adrian D.D. Influence of porosity on piping models of levee failure // J.Geothech.Engng.– 2001.– 127, N 4.– P. 3–6.
5. Поляков В.Л. Оценка влияния внутренней суффозии на эффективность увлажнения несвязных грунтов // Вісник НУВГП. Рівне: НУВГП.– 2007.– Вип. 4(40), част. 1.– С. 350–357.
6. Поляков В.Л. Внутренняя суффозия при интенсивном увлажнении несвязных грунтов (первая и вторая стадии насыщения) // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліка. КНУБА.– 2008.– Вип. 10.– С. 107–118.
7. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды.– М.: Гостехиздат, 1960.– 250 с.
8. Дмитриев А.Ф., Хлапук Н.Н., Дмитриев Д.А. Деформационные процессы в несвязных грунтах в придренированной зоне и их влияние на работу осушительно-увлажнительных систем.– Ровно: Изд-во РГТУ, 2002.– 145 с.
9. Дмитрієв Д.А. Про вплив градієнта напору на коефіцієнт фільтрації незв'язних ґрунтів // Вісник Укр.Держ.акад.водн.госп-ва.– 1998.– 4.2.– С. 23–27.
10. Олейник А.Я. Геогидродинамика дренажа.– К.: Наукова думка, 1982.– 283 с.
11. Шестаков В.М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа.– М.: Изд-во МГУ, 1965.– 233 с.
12. Духовный В.А., Баклушин М.Б., Томин Е.Д., Серебренников Ф.В. Горизонтальный дренаж орошаемых земель.– М.: Колос, 1979.– 255 с.
13. Мурашко А.И., Сапожников Е.Г. Защита дренажа от заиливания.– Минск: Ураджай, 1978.– 168 с.

14. 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.: НАНУ, Ин-т гидромеханики, 2000.– 332 с.
15. Сидор В.Б. Порівняльний аналіз значущості суфозійного та фільтраційного процесів при функціонуванні різних типів дренажу // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. КНУБА.– 2005.– Вип. 4.– С. 114–124.
16. Климко А.И., Канцибер Ю.А. Расчетный модуль дренажного стока в нечерноземной зоне РСФСР // Гидротехника и мелиорация.– 1983.– № 1.– С. 54–56.
17. Шкиннис Ц.Н. Гидрологическое действие дренажа.– Л.: Гидрометеоиздат, 1981.– 311 с.
18. Мелиорация и водное хозяйство. 3. Осушение: Справочник Под ред. Б.С.Маслова.– М.: Агропромиздат, 1985.– 447 с.
19. Эггельсман Р. Руководство по дренажу.– М.: Колос, 1984.– 247 с.
20. Поляков В.Л. Механическая суффозия в дренируемом грунте // Прикладна гідромеханіка.– 2002.– Т. 4(76), № 4.– С. 60–73.
21. Поляков В.Л., Сидор В.Б. Внешняя суффозия в несвязных грунтах при радиальной фильтрации // Прикладна гідромеханіка.– 2004.– Т. 6(78), № 4.– С. 68–77.
22. Поляков В.Л., Желизко В.В. Напорная фильтрация к совершенной дрене в нессуффозионном Грунте // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. КНУБА.– 2008.– Вип. 11.– С. 112–127.
23. Поляков В.Л. Фильтрационные деформации несвязных нессуффозионных грунтов при установившейся одномерной безнапорной фильтрации // Доповіді НАН України.– 2009.– № 4.– С. 51–57.
24. Поляков В.Л., Желизко В.В. Установившаяся напорная фильтрация к малому сферическому стоку в несвязном нессуффозионном грунте // Прикладна гідромеханіка.– 2009.– Т. 11(83), № 2.– С. 68–79.
25. Ивицкий А.И. Основы проектирования и расчетов осушительных и осушительно-увлажнительных систем.– Минск: Наука и техника, 1988.– 311 с.
26. Олейник А.Я., Поляков В.Л. Дренаж переувлажненных земель.– К.: Наук.думка, 1987.– 280 с.