

УДК 581.1: 631.4

МЕХАНИЧЕСКАЯ СУФФОЗИЯ В ДРЕНИРУЕМОМ ГРУНТЕ

В. Л. ПОЛЯКОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 05.03.2002

На основе математической модели механической суффозии в двухфракционном несвязном грунте рассматривается развитие в нем фильтрационных деформаций. Суффозионный процесс инициируется дренажем, действующим в различных режимах. Выведено уравнение для скорости воды при изменении содержания твердой фазы. Получено строгое решение нестационарной задачи при постоянном расходе дрены Q и установлено наличие в области деформаций двух характерных зон. В случае переменного Q многочисленные расчеты выполнены, исходя из численного решения характеристической системы. Проведен детальный анализ изменения важнейших физико-механических характеристик. Опираясь на модифицированную формулу Козени-Кармана, оценено относительное увеличение проницаемости, которое обусловлено перераспределением и выносом суффозионных частиц.

На основі математичної моделі механічної суфозії у двофракційному нез'язному ґрунті розглядається розвиток у ньому фільтраційних деформацій. Суфозійний процес ініціюється дренажем, який діє у різних режимах. Отримано рівняння для швидкості води при зміні вмісту твердої фази ґрунту. Знайдено точний розв'язок неусталеної задачі при постійній витраті дрени Q і встановлена наявність в області деформації двох характерних зон. У випадку змінного Q численні розрахунки виконані, виходячи з чисельного розв'язку характеристичної системи. Детально проаналізовані зміни найважливіших фізико-механічних характеристик. Спираючись на модифіковану формулу Козені-Кармана, оцінено відносне збільшення проникності, яке обумовлене перерозподілом і виносом суфозійних частинок.

Filtration deformations in two-fraction cohesionless soil due to solid particles transport are considered. The mass transfer is initiated by drainage acting under different conditions. An equation for the velocity of ground-water is deduced when the content of solid phase is changing. An exact solution to the transient problem is obtained at the constant drainage discharge and existence of two distinctive zones is established in the deformation domain. In the case of variable drainage discharge a great number of computations are performed coming from a numerical solution to the characteristic system. A detailed analysis is conducted of the changes in physical and mechanical values. On the basis of the Cozeny-Carman formula modified a relative increase in hydraulic conductivity owing to solid particles re-distribution is evaluated.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью многих несвязных грунтов является содержание в них сравнительно большого количества (до 10% и выше от массы твердой фазы) мелких (пылеватых) частиц [1]. В отличие от более крупных структурообразующих частиц они могут захватываться и переноситься фильтрационным потоком. Их взаимодействие со скелетом грунта носит чисто механический характер, а механизм такого взаимодействия подробно анализируется в [2]. Перенос еще более мелких коллоидных частиц, который в некоторых случаях может давать значимый вклад в общий массовый расход [3, 4], выходит за рамки данных исследований. При интенсивном движении подземных вод к участкам их разгрузки (водотоки, водохранилища), к водоприемным и водорегулирующим устройствам, сооружениям (скважины, завесы, горизонтальные дрены) часто течение вблизи выходного сечения потока становится существенно неравномерным (градиент напора меняется на порядки). Именно здесь создаются особые физико-механические условия, способствующие сначала взвешиванию, а затем и перемеще-

нию твердых частиц, их выносу из области фильтрации (механическая суффозия) [5–7]. Кстати, в принципе сходная картина наблюдается при движении взвешенных потоков и наносов [8, 9], выпадении обильных осадков [10], работе фильтров в очистных сооружениях [11, 12]. В итоге, в грунте прежде всего образуется зона с низкой концентрацией суффозионных частиц и, следовательно, меньшим содержанием твердой фазы в целом. При первоначально большом количестве таких частиц существует опасность, что приложение внешних нагрузок вызовет необратимые деформации сжатия [13]. Обстоятельно закономерности деформаций объема грунта за счет сложного напряженного состояния описаны, например, в [14, 15]. Переуплотнение грунта, причем на ответственном участке потока грунтовых вод, ведет к резкому ухудшению фильтрационных условий. В то же время, наблюдается заиливание природных и инженерных объектов, аккумулирующих выносимые частицы. Так, в случае мелиоративного дренажа причиной этого явления оказывается относительно малая скорость воды в дренах, которой часто недостаточно для удаления более крупных частиц из пылеватых или песчаных [1].

Еще более неблагоприятный фильтрационный режим в суффозионных грунтах может сформироваться в отсутствие выноса подвижных частиц. Тогда массоперенос обуславливает значительную неоднородность в распределении подобных частиц в области фильтрации с образованием наряду с суффозионными зонами и зон с их повышенным содержанием (кольматационные зоны). Вследствие постепенного накопления частиц в кольматационных зонах уменьшается пористость грунта (возможна даже закупорка более мелких пор) и, в конце концов, может заметно снизиться эффективность осушительных и увлажнительных мероприятий, осложниться работа подземных водозаборов, фильтров и т. д. [16 – 18].

Важное значение суффозионных и кольматационных процессов для гидротехнического, мелиоративного строительства, охраны окружающей среды, а также технологий очистки промышленных и бытовых стоков предопределили обширные исследования развития указанных процессов и появление в этом направлении значительной по объему и содержанию литературы. К существенным теоретическим результатам следует отнести ряд физических и математических моделей фильтрационных деформаций несвязных грунтов, их анализ аналитическими и численными методами [19 – 22]. В подобных работах, однако, не использовались в должной мере материалы многочисленных экспериментов, например [23 – 26], в ходе которых изучались критерии деформирования грунта, характер деформаций и влияние на них разнообразных факторов. Объектом натуральных и лабораторных исследований деформационных процессов служили и реальные грунты, представляющие собой сложные дисперсные системы, и модельные грунты, приготовленные путем смешивания твердых частиц двух-трех сортов. При искусственно сформированном механическом составе грунта в значительной мере облегчается установление специфических особенностей в поведении суффозионных частиц и, в первую очередь, условий их взвешивания, динамики взаимодействия с фильтрационным потоком, структурной частью твердой фазы. В данной работе преследовалась цель углубить понимание механизма и общих закономерностей деформирования несвязных грунтов. В связи с этим было проведено детальное изучение совместной фильтрации и массопереноса теоретическими методами применительно к двухфракционному грунту. Одна из фракций образует скелет грунта, а вторая составлена из суффозионных частиц примерно одного размера. Анализируются вызванные суффозионным процессом

изменения фильтрационных характеристик грунта (пористость, проницаемость), а также кинематика фильтрационного течения при постоянном и переменном притоке гидросмеси (вода и твердые частицы) к дрене. Течение воды в грунте до начала деформаций носило стационарный характер и практически полностью определялось исходным расходом дрены. Неравномерность движения грунтовых вод, мобильность частиц второй фракции наряду с изменением во времени указанного расхода обуславливают нестационарность фильтрации и массопереноса на придренном участке фильтрационного потока (область деформаций). При значительных длине дрены и ее удалении от контура питания физико-механическим процессам вблизи дрены свойственна осевая симметрия, что является основанием для осесимметричной постановки математической задачи.

При построении исходной математической модели использовано существенное допущение относительно формы связи скоростей частиц и воды, характеризующей взаимодействие соответствующих потоков. Указанное допущение сделано на основе анализа равновесия сил, действующих на суффозионные частицы, и результатов специальных экспериментов. Таким образом, есть все основания считать, что подобные частицы приходят в движение только после приложения определенной гидродинамической силы [27]. Величина упомянутой силы вследствие малой интенсивности фильтрационных процессов (при ламинарном режиме течения) пропорциональна скорости движения или расходу воды. В ряде работ, посвященных явлению суффозии, определялось пороговое значение градиента давления (напора) I_k , при котором наблюдается взвешивание частиц и тем самым создаются предпосылки к массопереносу [24, 25]. Однако более универсальной физической характеристикой является критическая скорость воды u_k , так как величина I_k выражается через u_k , коэффициент фильтрации и пористость грунта, а значит в отличие от u_k меняется в зависимости от выбора фильтрационных параметров.

Для описания обмена суффозионными частицами между твердой и жидкой фазами пористой среды было принято применять модели, заимствованные из химической кинетики [28, 29]. Однако такой чисто формальный подход вряд ли уместен из-за принципиальных отличий в механизмах обменных процессов при механической суффозии и, например, адсорбции, ионном обмене, растворении. Поэтому представляется более перспективным подход, реализованный ниже, при котором переход твердых частиц в подвижное состояние

и, наоборот, их осаждение объясняются достижением скоростью воды (гидравлической силой) соответствующего значения u_k . Очевидно, что u_k зависит от размеров и формы частиц, и поэтому в случае реальных грунтов, являющихся, как правило, полидисперсными средами, следует вводить несколько значений u_k по количеству фракций суффозионной составляющей твердой фазы. Тогда в рассматриваемом случае двухфракционного грунта обменный процесс достаточно охарактеризовать единым значением u_k .

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Движение суффозионных частиц осуществляется преимущественно за счет их конвективного переноса. Молекулярная и дисперсная составляющие общего диффузионного механизма массопереноса заметной роли в балансе указанных частиц не играют. В частности, размеры пылеватых и песчаных частиц являются слишком большими для реализации Броуновского движения и молекулярной диффузии [29]. Также оказывается несущественным и движение частиц вследствие неравномерности фильтрации в порах (гидродинамическая дисперсия) при изменении физико-механических параметров в характерных для суффозионного процесса диапазонах [28].

Основу математической модели совместных плоско-радиальной фильтрации и переноса суффозионных частиц в области фильтрационных деформаций составляет система уравнений [28]

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_w}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_w u), \\ \frac{\partial n_c}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r n_c (u - u_k)], \end{aligned} \quad (1)$$

где n_w, n_c – доли объема грунта, приходящиеся на воду, частицы второй фракции в подвижном или взвешенном состоянии соответственно; u – действительная скорость воды; r – радиальная координата, t – время. В дальнейшем, по существу независимо, решаются две задачи Коши: система (1) и начальные условия

$$u(0, r) = w_1(r), \quad n_c(0, r) = m_c; \quad (2)$$

система (1) и граничные условия

$$u(t, r_0) = w_2(t), \quad n_c(t, r_{*0}) = m_c. \quad (3)$$

Здесь r_0, r_{*0} – внутренний и внешний радиусы области деформаций, m_c – доля объема исходного

грунта, занятого частицами второй фракции (распределены равномерно). Необходимость в параллельном решении задач (1), (2) и (1), (3) при теоретическом исследовании физико-механических процессов в указанной области диктуется существенными отличиями в поведении суффозионных частиц на разных ее участках (зонах). Величины n_w, n_c , характеризующие содержание воды и распределение взвешенных и подвижных частиц в пределах от r_0 до r_{*0} , связаны с объемным содержанием структурных частиц m_s соотношением

$$n_w + n_c = 1 - m_s. \quad (4)$$

Расход воды и твердых частиц, притекающих к дрене, в зависимости от функционального назначения дренажа, его конструктивных особенностей, технико-эксплуатационных ограничений может быть или постоянным (расход на единицу длины дрены $Q = \text{const}$), или изменяться со временем ($Q = Q(t)$). Если величина расхода регулируется непосредственно техническими средствами, то она не зависит от природных условий и представляет собой известную функцию от t . При других эксплуатационных режимах, например, при постоянном напоре на дрене, расход Q тесно связан с водно-физическими условиями в области фильтрации и на ее границах. В таком случае он заранее неизвестен и должен находиться из решения фильтрационной задачи. Однако и в последнем случае часто величину $Q(t)$ удается оценить с использованием данных наблюдений, полученных на объектах-аналогах, или благодаря проведению специальных испытаний. В данной работе расход считается заданной функцией от t . Вместе с тем отдельно и обстоятельно изучен частный случай $Q = \text{const}$ ввиду его самостоятельного практического значения и больших возможностей в исследованиях аналитическими методами.

Складывая уравнения системы (1) и принимая во внимание соотношение (4), легко получить

$$\frac{\partial}{\partial r} [r n_w u + r n_c (u - u_k)] = 0.$$

Отсюда вытекает, что поток гидросмеси в области деформаций в общем случае со временем меняется, но не зависит от r . Такие изменения обусловлены переменной величиной $Q(t)$, причем

$$n_w u + n_c (u - u_k) = \frac{Q}{2\pi r}. \quad (5)$$

Таким образом, скорость u и концентрация n_c выражаются через расход Q следующим образом:

$$u = \frac{u_k}{1 - m_s} n_c + \frac{Q}{2\pi(1 - m_s)r}, \quad (6)$$

$$n_c = \frac{1 - m_s}{u_k} u - \frac{Q}{2\pi u_k r}. \quad (7)$$

Размеры области деформаций определяются начальным расходом дрены, содержанием частиц обеих фракций твердой фазы в недеформируемом грунте и остаются неизменными. Координата внешней границы r_{*0} будет

$$r_{*0} = \frac{Q(0)}{2\pi u_k (1 - m_s - m_c)}. \quad (8)$$

С использованием безразмерных переменных $\bar{u} = \frac{u}{u_k}$, $\bar{r} = \frac{r}{L}$, $\bar{t} = \frac{t}{T}$ задача (1) – (3) принимает вид

$$\frac{\partial n_w}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} (\bar{r} n_w \bar{u}), \quad (9)$$

$$\frac{\partial n_c}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} [\bar{r} n_c (\bar{u} - 1)],$$

$$\bar{u}(0, \bar{r}) = \bar{w}_1(\bar{r}), \quad n_c(0, \bar{r}) = m_c, \quad (10)$$

$$\bar{u}(\bar{t}, \bar{r}_0) = \bar{w}_2(\bar{t}), \quad n_c(\bar{t}, \bar{r}_{*0}) = m_c, \quad (11)$$

где $\bar{r}_0 = \frac{r_0}{L}$, $\bar{r}_{*0} = \frac{r_{*0}}{L}$. Масштабы длины L и времени T равны соответственно

$\frac{Q(0)}{2\pi u_k (1 - m_s)}$ и подбирались с целью максимального упрощения расчетных зависимостей. В безразмерной форме выражения (6), (7) будут

$$\bar{u} = \frac{n_c}{1 - m_s} + \frac{\bar{Q}}{\bar{r}}, \quad (12)$$

$$n_c = (1 - m_s) \left(\bar{u} - \frac{\bar{Q}}{\bar{r}} \right), \quad (13)$$

где $\bar{Q} = \frac{Q}{Q(0)}$. При последующем написании переменных черточки над ними для удобства опускаются. В случае использования размерных величин будут сделаны соответствующие оговорки.

В результате несложных преобразований с учетом выражения (13) выведено уравнение относительно u , послужившее основой для теоретических исследований:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - \left(2u - 1 - \frac{Q}{r} \right) \frac{\partial u}{\partial r} = \\ = \frac{1}{r} \left(u^2 - u + \frac{dQ}{dt} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

В первую очередь рассматривается показательный в практическом и теоретическом отношениях случай $Q = \text{const}$, для которого удается получить

точные аналитические решения, причем в конечном виде. Решения обеих задач получены в параметрической форме. Для задачи (9), (10) расчетные зависимости представляются в виде

$$r = \frac{u - \zeta + \eta \zeta (\zeta - 1)}{u^2 - u},$$

$$t = -(1 + 2\mu) \ln \frac{\zeta(u - 1)}{(\zeta - 1)u} - \quad (15)$$

$$-(1 + \mu) \left(\frac{u}{u - 1} - \frac{\zeta}{\zeta - 1} \right) + \mu \left(\frac{u - 1}{u} - \frac{\zeta - 1}{\zeta} \right),$$

$$\zeta = w_1(\eta).$$

В свою очередь решение задачи (9), (11) выражается зависимостями

$$r = \frac{u - \zeta + r_0 \zeta (\zeta - 1)}{u^2 - u},$$

$$t - \xi = -(1 + 2\mu_0) \ln \frac{\zeta(u - 1)}{(\zeta - 1)u} - \quad (16)$$

$$-(1 + \mu_0) \left(\frac{u}{u - 1} - \frac{\zeta}{\zeta - 1} \right) + \mu_0 \left(\frac{u - 1}{u} - \frac{\zeta - 1}{\zeta} \right),$$

$$\zeta = w_2(\xi).$$

Здесь $\mu = \eta \zeta (\zeta - 1) - \zeta$, $\mu_0 = r_0 \zeta (\zeta - 1) - \zeta$.

В результате детального анализа экспериментальных данных и свойств решений (15), (16) установлено, что поведение суффозионных частиц на разных участках области деформаций принципиально отличается, причем четко просматриваются две характерные зоны. В одной из них (основной, если судить по ее относительному размеру) частицы постоянно находятся в подвижном состоянии. Их концентрация заметно ниже, чем в оставшейся части области, и, быстро убывая, стремится к 0, так что уместно эту зону характеризовать как зону полной деформации. Во второй зоне часть мобильных частиц сохраняется сколь угодно долго, находясь во взвешенном состоянии, и по существу ее можно рассматривать как зону частичной деформации. Положение границы между указанными зонами r_* изменяется со временем, то есть $r_* = r_*(t)$, и может определяться или из решения (15) при $u = 1$, или с использованием зависимостей (16) и вытекающей из них формулы для расчета распространения граничного значения u .

Для произвольного вида функций $w_i (i = 1, 2)$ представить аналогичные решения (15), (16) в более простой и удобной для расчетов форме не удастся. Тем не менее, в некоторых важных для практики случаях все-таки возможно избавиться от параметров ξ , η , ζ и свести параметрические представления решений к неявным функциям

$F_i(r, t, u) = 0$. В частности, исследуемым физико-механическим процессам в полной мере отвечают два вида функции w_1 . Если бы в начальный момент времени частицы второй фракции были неподвижными, а значит в дренае первоначально притекала только вода, то следовало бы принимать

$$w_1(r) = \frac{\alpha}{r}, \quad (17)$$

где $\alpha = \frac{1 - m_s}{1 - m_s - m_c}$. Однако точнее отражает специфику суффозионного процесса в начальный период другой вид w_1 , а именно

$$w_1(r) = \frac{1}{r} + \beta, \quad (18)$$

где $\beta = \frac{m_c}{1 - m_s}$. Для условия в форме (2), (17) (фактически это своего рода предельный случай с максимальным притоком к дренае воды и минимальным выносом частиц) зависимости (15) преобразуются в следующее выражение:

$$t = (2u + 2ru - 2ru^2 - 1) \ln \frac{\alpha - ru + u(ru - 1)}{u(ru - 1)} + \alpha - ru - \frac{(u - 1)(\alpha - ru)(r - ru + 1)}{\alpha - ru + u(ru - 1)}. \quad (19)$$

Для граничного условия (2), (18) из решения (15) следует

$$t = (2u + 2ru - 2ru^2 - 1) \ln \frac{\beta(1 - ru + r)}{(1 - \beta)(ru - 1)} + \frac{(1 + \beta r - ru)(2\beta u - u + 1 - \beta)}{\beta(1 - \beta)}. \quad (20)$$

Зависимости (19), (20) позволяют рассчитывать изменение скорости воды в любой момент времени, но только в зоне полной деформации ($r_0 \leq r \leq r_*$). Для расчета скорости u в зоне неполной деформации ($r_* \leq r \leq r_{*0}$) необходимо использовать уже решение (16), которое при $w_2 = 1$ сводится к виду

$$u = 1, \quad t = \alpha - r_* - \ln \frac{r_* - 1}{\alpha - 1}. \quad (21)$$

Из выражения (21) для r_* вытекает, что при $t \rightarrow \infty$ $r_* \rightarrow 1$. Следовательно, в качестве характерной длины фактически была выбрана окончательная протяженность зоны полной деформации.

При работе дренажных устройств с переменным расходом физическая картина вблизи них может заметно измениться, если характерное время переходных процессов в дренае сопоставимо или

превосходит аналогичное время подобных процессов в области деформаций. Справедливость этого замечания подтверждается результатами анализа динамики суффозионных частиц, выполненного на основе уравнения (14) при $Q = Q(t)$. Решение задачи (14), (10) при выборе функции w_1 в виде (17) или (18) сводилось к решению характеристической системы [30]

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{r} \left(u^2 - u + \frac{dQ}{dt} \right), \quad (22)$$

$$\frac{dr}{dt} = -2u + 1 + \frac{Q}{r},$$

при начальных условиях:

$$t = 0, \quad u = \zeta, \quad r = \frac{\alpha}{\zeta} \quad \text{или} \quad r = \frac{1}{\zeta - \beta}. \quad (23)$$

Такое решение работает в зоне полной деформации. Для второй зоны на базе системы (22) получено, что

$$u = 1, \quad r_* \leq r \leq r_{*0}, \quad (24)$$

а положение границы между зонами r_* оценивается из решения задачи

$$\frac{dr_*}{dt} = \frac{Q}{r_*} - 1, \quad r_*(0) = r_{*0}, \quad (25)$$

которое можно представить в аналитической форме только для некоторых видов $Q(t)$. Например, если $Q = Q_0 - at$ ($0 \leq t \leq Q_0/a$), то

$$r_* = (at - Q_0) \cdot s(t), \quad (26)$$

где $s(t)$ находится из уравнения

$$Y(s, s_0) = -\frac{1}{a} \ln(Q_0 - at),$$

$$Y = \frac{1}{2a} \ln \frac{as^2 + s + 1}{as_0^2 + s_0 + 1} - \frac{1}{a\sqrt{4a-1}} \times \left(\arctg \frac{2as + 1}{\sqrt{4a-1}} - \arctg \frac{2as_0 + 1}{\sqrt{4a-1}} \right) \quad \text{при } 4a > 1,$$

$$Y = \frac{1}{2a} \ln \frac{as^2 + s + 1}{as_0^2 + s_0 + 1} - \frac{1}{a\sqrt{1-4a}} \times \ln \left(\frac{2as + 1 - \sqrt{1-4a}}{2as + 1 + \sqrt{1-4a}} \times \frac{2as_0 + 1 + \sqrt{1-4a}}{2as_0 + 1 - \sqrt{1-4a}} \right) \quad \text{при } 4a < 1,$$

$s_0 = -\frac{r_{*0}}{Q_0}$. В частном случае $a = 0$, $Q = Q_0 = \text{const}$ выражение (26) с учетом $\frac{r_{*0}}{Q_0} = \alpha$ преобразуется к (21).

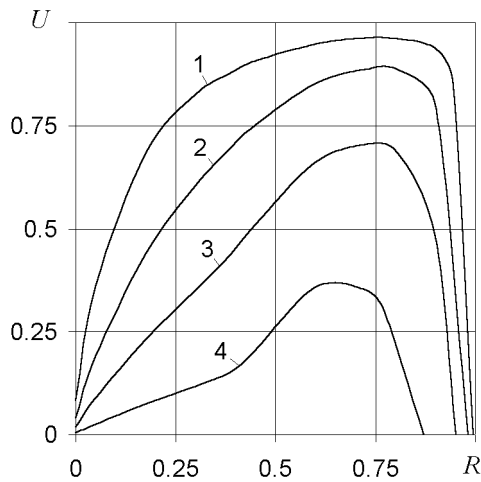


Рис. 1. Профили приведенной скорости грунтовых вод в области деформаций $U(R)$:
1 - $t = 0.03$; 2 - $t = 0.1$; 3 - $t = 0.3$; 4 - $t = 1$

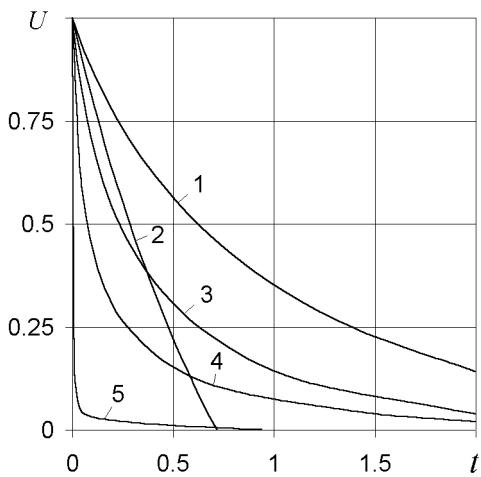


Рис. 2. Изменение во времени приведенной скорости грунтовых вод U :
1 - $R = 0.7239$; 2 - $R = 0.9$; 3 - $R = 0.3872$;
4 - $R = 0.1768$; 5 - $R = 0$

РАСЧЕТЫ ПРИМЕРОВ, АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Технические характеристики дренажей, фильтрационные и механические свойства несвязных грунтов в природе варьируются в широких пределах. В частности, средний диаметр суффозионных частиц в основном меняется от 0.01 до 0.05 мм, но достигает 0.5 мм [1, 24], коэффициент неоднородности (разнозернистости) превышает 10...20 [31]. Однако на первом этапе исследований фильтрационных деформаций, результаты которых частично представлены в данной работе, объектом изучения является двухфракционный грунт с базовыми параметрами $m_s = 0.54$, $m_c = 0.1$. Такой грунт интересен прежде всего в научном отношении, так

как позволяет глубже понять общие закономерности совместного протекания фильтрационных и суффозионных процессов, хотя изменчивость его механических и фильтрационных свойств, конечно, менее выражена. Поэтому основное внимание уделялось исследованию суффозии в типичных и критических условиях при существенном изменении двух параметров задачи – исходного содержания суффозионных частиц m_c и интенсивности переходных процессов в дрене. Предметом анализа была динамика фильтрационных (скорость воды, коэффициент фильтрации) и суффозионных (концентрация частиц второй фракции, интенсивность их выноса из области фильтрации) характеристик. Первая группа примеров относится к случаю постоянного расхода Q . Расчеты выполнялись на основе точных решений исходных задач, выраженных зависимостями (19) – (21). Скорость воды в области деформаций в этом случае менялась по двум причинам: во-первых, из-за осевой симметрии процессов, протекающих при неизменном вдоль указанной области (в радиальном направлении) расходе гидросмеси в каждый фиксированный момент времени, во-вторых, вследствие увеличения пористости. Определяющей является первая причина. Действительно, скорость u при приближении к дрене возрастает на порядок и более, а вынос частиц между тем способствует уменьшению u на проценты. Естественно, что при количественной оценке суффозионного процесса в центре внимания находятся как раз малые снижения скорости воды, вызванные второй причиной, которые для наглядности сопоставляются с максимальным снижением в этом случае (вследствие убывания концентрации n_c от m_c до 0). Поэтому большой интерес при изучении фильтрационных деформаций вызывает поведение приведенной скорости $U = \frac{u(t, r) - u(\infty, r)}{u(0, r) - u(\infty, r)}$, где $u(\infty, r)$ – минимальная в круговом сечении потока $r = \text{const}$ скорость воды, которая вычисляется по формуле (12) при $n_c = 0$. Разница между $u(0, r)$ и $u(\infty, r)$ при начальном условии (10), (17) равна $(\alpha - Q)/r$, а при условии (10), (18) не зависит от r и равна β . Именно функция $U(t, r)$ может дать весьма полное представление о трансформации фильтрационного режима при развитии деформационного процесса. На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов указанной функции с применением условий (10), (17) в зоне полной деформации. Здесь и при последующем изложении материалов теоретического анализа используется приведенная координата $R = \frac{r - r_0}{r_{*0} - r_0}$, так что в пределах области деформа-

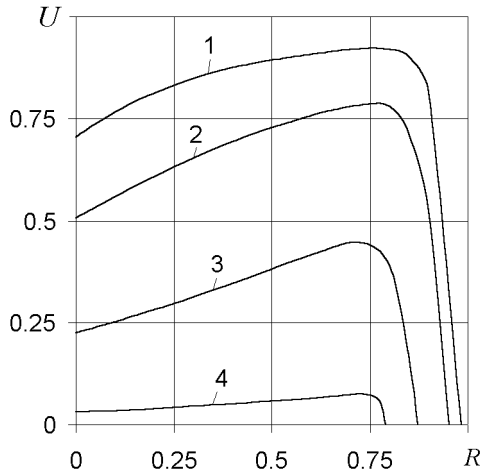


Рис. 3. Профили приведенной скорости грунтовых вод в области деформаций $U(R)$:
 1 - $t = 0.1$; 2 - $t = 0.3$; 3 - $t = 1$; 4 - $t = 3$

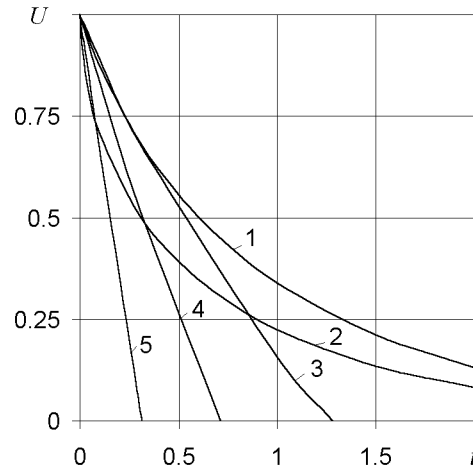


Рис. 4. Изменение во времени приведенной скорости грунтовых вод U :
 1 - $R = 0.38$; 2 - $R = 0$; 3 - $R = 0.85$;
 4 - $R = 0.9$; 5 - $R = 0.95$

ций $0 \leq R \leq 1$. Как видно из рис. 1, в зоне частичной деформации $U = 0$ (согласно выражению (21) в этой зоне $u = 1$). Пересечение рассчитанных на разные моменты времени кривых $U(R)$ с осью абсцисс происходит в точках с координатами R_* , которые таким образом указывают и на местоположение границы между зонами, и на скорость ее перемещения. Резкое изменение функции U при малых R объясняется здесь быстрым ростом доли твердых частиц в потоке гидросмеси, притекающей к дрене. В центральной части рассматриваемой области (примерно $0.55 < R < 0.75$) приведенная скорость фактически зависит только от времени. Рис. 2 свидетельствует о существенных отличиях в характере снижения скорости U в разных сечениях потока. По мере удаления от дрены убывание функции $U(t)$ замедляется (кривые 1, 3, 4, 5). В пределах зоны полной деформации кривые $U(t)$ при $t \rightarrow \infty$ асимптотически приближаются к оси абсцисс. На участке $r_* < r < r_{*0}$ функция $U(t)$ обращается в 0 в конечные моменты времени t_* , значения которых зависят от выбранного радиуса r (или R). Так, для $R = 0.9$ $U = 0$ при $t_* = 0.712$ (кривая 2). Снижение скорости U при $R = 0.9$ происходит медленнее, чем при $R = 0.723$ вследствие того, что при $r_* \leq r < r_{*0}$ $u(\infty, r) = 1$ (при $r_0 \leq r < r_*$ $u(\infty, r) = 1/r$).

Однако основное внимание было уделено анализу деформации грунта, начальное физико-механическое состояние которого характеризуется условиями (10), (18). В первую очередь определялись значения приведенной скорости U в характерные моменты времени на различном удалении от дрены. На рис. 3 показаны профили приведен-

ной скорости $U(R)$ при $t = 0.1, 0.3, 1, 3$. Видно, что понижение скорости U происходит в большей части зоны полной деформации более равномерно. В этом состоит принципиальное различие между рис. 1 и 3, которое связано с разным состоянием содержания твердых частиц и воды в общем количестве гидросмеси, поступающей в дрину в начальный период суффозии. На участке вблизи границы между зонами влияние вида функции w заметно слабее, поэтому формы соответствующих кривых $U(R)$ на рис. 1 и 3 мало отличаются. Снижение скорости воды в основной зоне ($r_0 < r < r_*$), обусловленное выносом части грунта, происходит быстрее вблизи дрены (кривые 1, 2 на рис. 4, рассчитанные при фиксированном r). Во второй зоне вследствие перемещения границы r_* и $u(\infty, r) = 1$ наблюдается падение U до 0. Указанная граница проходит через точки с координатами $R = 0.95, 0.9, 0.85$ соответственно в моменты $t_* = 0.267, 0.712, 1.277$. По мере увеличения протяженности зоны частичной деформации, вплоть до максимальной, величина ($r_* = 1$) t_* растет неограниченно.

Изменения скорости u , происходящие со временем и иллюстрируемые рис. 1 – 4, обусловлены выносом суффозионных частиц и контролируются их концентрацией в зоне полной деформации. Непосредственно распределение таких частиц вдоль области деформаций в различные моменты времени, то есть функция $n_c(t, r)$, находится при известной скорости U по формуле (13), причем в обеих зонах одновременно. Однако если в основной зоне величина u зависит от времени, то в зоне частичной деформации $u = 1$, а значит частицы непо-

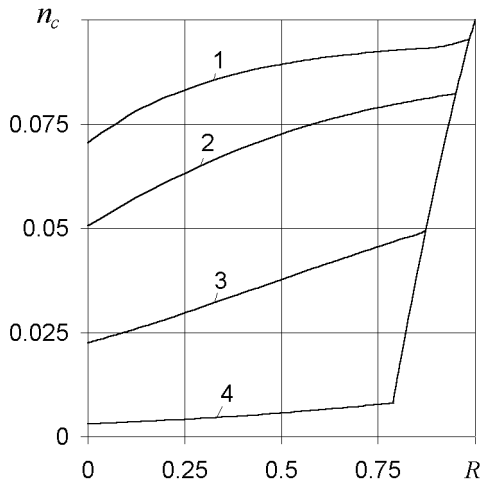


Рис. 5. Профили концентрации суффозионных частиц в области деформаций $n_c(R)$:
 1 – $t = 0.1$; 2 – $t = 0.3$; 3 – $t = 1$; 4 – $t = 3$

движны и искомая $n_c(r)$ в ней будет

$$n_c = (1 - m_s) \left(1 - \frac{1}{r}\right). \quad (27)$$

Из формулы (27) следует, что к моменту t в зоне неполной деформации аккумулируется количество частиц в объемном выражении

$$N = \int_{r_*}^{r_{*0}} n_c dr = (1 - m_s) \left(r_{*0} - r_* + \ln \frac{r_*}{r_{*0}} \right), \quad (28)$$

где r_* в расчетный момент времени вычисляется согласно выражения (21). Таким образом, окончательное количество частиц N_∞ , сохранившихся в области деформации, составит

$$N_\infty = (1 - m_s) (r_{*0} - 1 - \ln r_{*0}). \quad (29)$$

На рис. 5 показаны профили концентрации суффозионных частиц в обеих зонах на моменты $t = 0.1, 0.3, 1, 3$. Кривые 1–4, характеризующие содержание таких частиц в основной зоне, ограничены справа кривой содержания взвешенных частиц, рассчитанной согласно выражения (27). Как видно из рис. 5, уже к моменту $t = 3$ подавляющая часть суффозионных частиц из зоны полной деформации будет вынесена (в ней еще останется около 6% от их первоначального количества). Оставшиеся частицы также постепенно поступят в дренаж за исключением доли процента, которая в конце концов окажется во второй зоне. Общее количество частиц второй фракции, сохранившихся в области деформации, вычисляется по формуле (29) и в данном примере равно примерно 0.015, то есть около 15%.

Увеличение пористости грунта за счет выноса твердых частиц и уменьшения объема твердой фазы ведет к росту проницаемости грунта k и коэффициента фильтрации. Оценка величины k как функции от r и t для двухфракционного деформируемого грунта при постоянном расходе дренажа должна выполняться на базе формулы (13) с привлечением зависимости между k и n_w . Предложен ряд эмпирических формул для разных типов грунтов [32–34]. В случае несвязных грунтов в приложениях широко используется формула Козени-Кармана, отражающая особенности механического состава грунта (посредством выбора характерного размера зерен твердой фазы), и способ их компоновки. Естественно, что более эффективной эта формула оказывается применительно к грунтам, сложенным из частиц одного сорта (сходных размера и формы). Вместе с тем использование среднего (эффективного) диаметра в качестве интегрального показателя кривой гранулометрического состава для суффозионных грунтов нежелательно. Во-первых, твердая фаза таких грунтов разнородна и состоит, как минимум, из двух фракций, причем размеры частиц разных фракций сильно отличаются, во-вторых, соотношение между суммарным количеством частиц фракций при суффозии постоянно меняется. Поэтому целесообразно формулу Козени-Кармана несколько модифицировать, приспособив ее к полидисперсному грунту. Пусть в состав твердой фазы грунта входят, помимо частиц структурообразующей фракции с объемным содержанием m_s и диаметром (средним) d_s , также p фракций мелких частиц, характеризующихся параметрами m_{ci}, d_{ci} ($i = 1, 2, \dots, p$). Тогда указанная формула трансформируется в следующую:

$$k = \chi^2 \frac{d_s^2 n_w^3}{180(1 - n_w)^2}, \quad (30)$$

где $\chi = \frac{1 + \sum_{i=1}^p \alpha_i}{1 + \sum_{i=1}^p \alpha_i D_i}$, $\alpha_i = \frac{m_{ci}}{m_s}$, $D_i = \frac{d_s}{d_{ci}}$, k измеряется в m^2 , d_s в м.

В случае двухфракционного грунта

$$\chi = \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha D}, \quad (31)$$

где $\alpha = \frac{m_c}{m_s}$, $D = \frac{d_s}{d_c}$, d_c – средний диаметр суффозионных частиц. Кроме того, движущиеся со скоростью u ($u_c \leq u$) твердые частицы оказывают определенное сопротивление фильтрационному

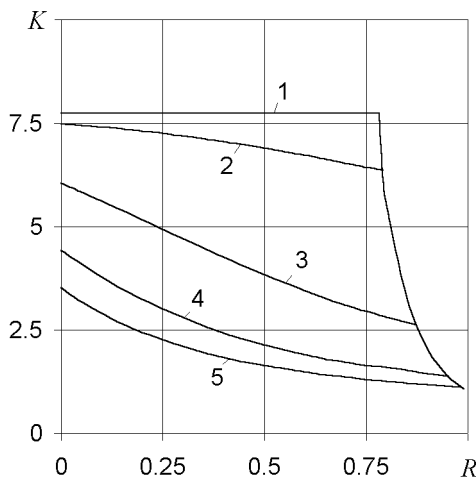


Рис. 6. Профили относительной проницаемости $K(R)$: 1 - $\bar{t} \rightarrow \infty$; 2 - $\bar{t} = 3$; 3 - $\bar{t} = 1$; 4 - $\bar{t} = 0.3$; 5 - $\bar{t} = 0.1$

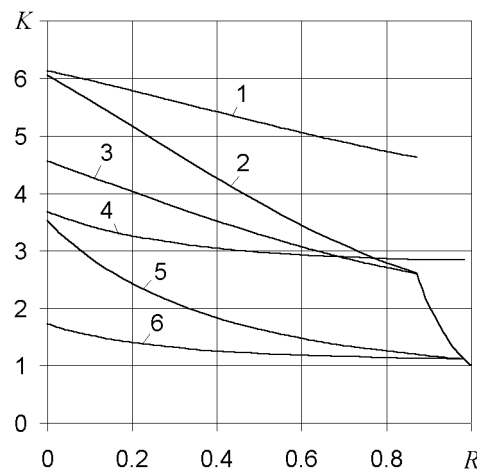


Рис. 7. Относительное изменение фактической и предельных величин проницаемости: 1, 2, 4 - $t = 1$; 3, 5, 6 - $t = 0.1$; 1, 4 - K_{max} ; 2, 5 - $k(u)$; 3, 6 - K_{min}

течению, что тоже должно сказываться на величине k . В первом приближении формулу (30), (31) можно обобщить на этот случай, скорректировав коэффициент χ , а именно приняв его равным $\delta \frac{n_c}{m_s}$. Значение δ зависит от u , u_c и находится, исходя из двух предельных случаев переноса частиц. Так, при $u_c = u$ вторая фракция вообще не влияет на проницаемость грунта и значит $\delta = 0$. При неподвижных частицах этой фракции $\delta = 1$. Если выбрать для зависимости δ от отношения размерных скоростей частиц и воды линейную форму, то легко найти

$$\delta = \frac{1}{u}, \quad \alpha = \frac{n_c}{m_s u}. \quad (32)$$

Итак, функцию $k(t, r)$ для простейшего деформируемого грунта предлагается рассчитывать по формулам (30), (31), но при значении α , выраженном согласно соотношения (32). При анализе влияния суффозии на режим фильтрации более показательна относительная проницаемость $K = k/k_0$, где k_0 - проницаемость исходного грунта. Выражение для K вытекает из соотношений (31), (32) и может быть приведено к виду

$$K = \frac{(1 - m_s - n_c)^3 (m_s u + n_c)^2 (m_s + Dm_c)^2}{(1 - m_s - m_c)^3 (m_s + n_c)^2 (m_s u + Dn_c)^2}. \quad (33)$$

Результаты расчета относительной величины K по формуле (33) на различные моменты времени приведены на рис. 6. Наибольшее значение $K = 7.738$ достигается в зоне полной деформации (кривая 1) при $t \rightarrow \infty$. В зоне частичной деформации величина K изменяется только на границе

со второй зоной по мере ее перемещения (кривая б). В целом, представленные на рис. 6 данные свидетельствуют о возможности значимого увеличения проницаемости и коэффициента фильтрации в области деформаций.

Целесообразность выполненного обобщения формулы Козени-Кармана на случай подвижных частиц подтверждается результатами сопоставления величины K с предельными величинами K_{max} , K_{min} , которые ограничивают K сверху и снизу. Выражение для K_{max} получено с использованием допущения об отсутствии взаимного влияния фильтрационного потока и влекомых им частиц:

$$K_{max} = \frac{(m_s + Dm_c)^2 (1 - m_s - n_c)^3}{(1 - m_s - m_c)^3 (m_s + n_c)^2}.$$

Выражение для K_{min} , также вытекающее из формулы (33), имеет вид

$$K_{min} = \frac{(m_s + Dm_c)^2 (1 - m_s - n_c)^3}{(1 - m_s - m_c)^3 (m_s + Dn_c)^2}.$$

и предполагает, что такие частицы рассматриваются как часть скелета грунта. На рис. 7 показаны профили относительной проницаемости на момент $t = 0.1$ и 1 (кривые 5 и 2) вместе с соответствующими мажорантами. Так, кривая 2 ($t = 0.1$) расположена между кривыми $K_{max}(R)$ и $K_{min}(R)$, пересекаясь с последней на границе между зонами R_* . Аналогично кривая 5 ($t = 1$) ограничивается кривыми 4 (K_{max}) и 6 (K_{min}). Вообще характер взаимного расположения кривых $K(R)$, $K_{max}(R)$, $K_{min}(R)$ говорит о том, что коэффициент фильтрации деформируемых грунтов может заметно

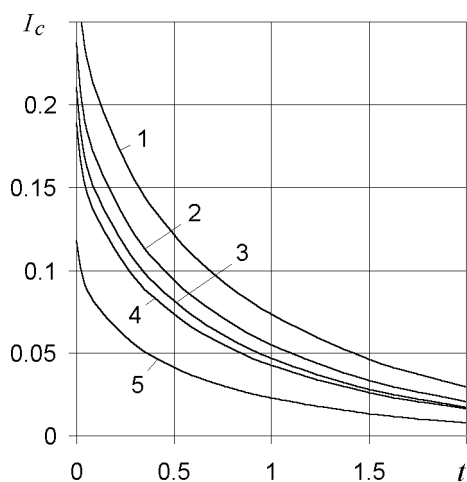


Рис. 8. Удельный расход суффозионных частиц при $r = r_0$:

1 – $m_s = 0.49$; $m_c = 0.15$; 2 – $m_s = 0.59$; $m_c = 0.1$;
 3 – $m_s = 0.54$; $m_c = 0.1$; 4 – $m_s = 0.49$; $m_c = 0.1$;
 5 – $m_s = 0.59$; $m_c = 0.05$

меняться вследствие движения суффозионных частиц.

Наряду с повышением пористости и коэффициента фильтрации грунта, способствующим более эффективной работе дренажа, вынос твердых частиц может приводить к заилению водоприемных и водопроводящих дренажных систем, отдельных устройств, что имеет обратный эффект. Поэтому для предотвращения чрезмерного накопления частиц в указанных системах и устройствах необходимо подбирать конструкцию дренажа и режим его работы, опираясь на прогноз динамики притока частиц в дренаж. Полученные выше решения позволяют просто рассчитывать удельный объемный поток частиц на дрене $I_c(t)$, используя следующее выражение:

$$I_c = n_c(u - 1). \quad (34)$$

Для конкретных расчетов интенсивности выноса частиц второй фракции выбирались грунты с существенно различными значениями m_c (0.05, 0.1 и 0.15). Доля частиц скелета менялась при этом от 0.49 до 0.59. Соответствующие кривые $I(t)$ с необходимыми пояснениями даны на рис. 8. Очевидно, что интенсивность I_c в большей степени зависит от исходного количества суффозионных частиц, причем увеличение m_c ведет к аналогичному росту I_c . Со временем часть общего потока гидросмеси, формирующаяся за счет переноса указанных частиц, быстро сокращается (к моменту $t = 1$ примерно в 4 раза).

Также был выполнен детальный анализ взаимосвязанных фильтрационного и суффозионно-

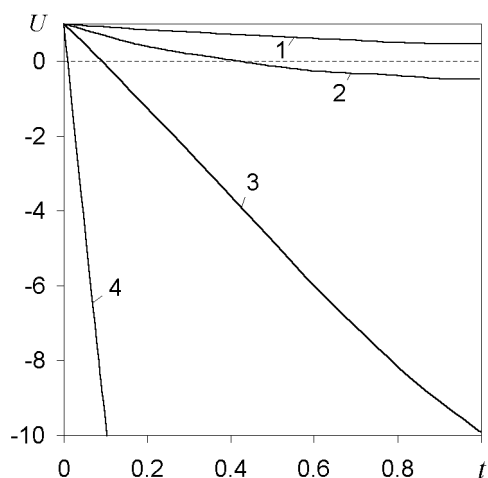


Рис. 9. Изменение приведенной скорости U со временем на дрене ($r = r_0$):

1 – $\lambda = 0$; 2 – $\lambda = 0.01$; 3 – $\lambda = 0.1$; 4 – $\lambda = 1$

го процессов при переменном расходе дрены $Q = Q(t)$. Как свидетельствуют наблюдения за работой дренажа в натуральных условиях, для кривой спада расхода характерна экспоненциальная форма [35, 36]. Имея в виду, что дренаж при устойчивом питании фильтрационного потока может функционировать и в нестационарных, и в стационарных условиях, функция $Q(t)$ выбиралась в следующем (безразмерном) виде:

$$Q(t) = \beta + (1 - \beta)e^{-\lambda t}, \quad (35)$$

где β есть стационарное значение Q . В первую очередь изучалось влияние на физико-механические процессы переходных процессов в дрене, характеризуемых показателем λ . Поэтому сначала полагалось $\beta = 0$. Значения же λ изменялись в разных примерах на два порядка ($\lambda = 0.01, 0.1$ и 1) с тем, чтобы полнее оценить значимость переходных процессов для суффозии при разнообразных режимах работы дренажа.

Уже из результатов расчетов приведенной скорости U , представленных на рис. 9, 10, можно сделать вывод о сопоставимом влиянии суффозионного и переходных процессов только при малых значениях λ . Действительно, изменения скорости u на дрене со временем (рис. 9) при $Q = \text{const}$ (кривая 1) и за счет медленного снижения Q ($\lambda = 0.01$, кривая 2) почти одинаковые. Следует заметить, что для корректного сравнения скорости воды в случаях $Q = \text{const}$ и $Q = Q(t)$ при вычислениях $U(r, t)$ использовались одни и те же величины $u(\infty, r)$, $u(0, r)$. Но при $\lambda = 0.1$ (кривая 3) и тем более при $\lambda = 1$ (кривая 4) влияние $Q(t)$ на динамику фильтрационного режима вблизи дрены будет

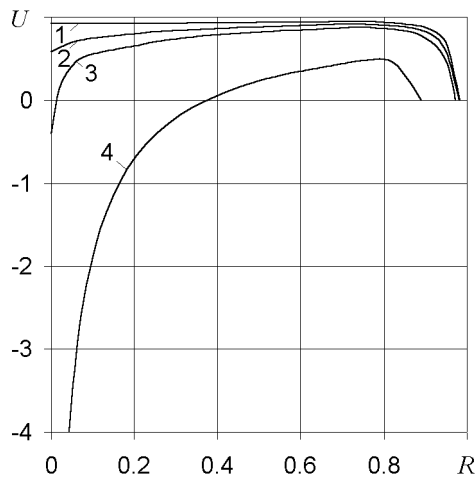


Рис. 10. Профили приведенной скорости $U(R)$ при $t = 0.1$:

1, $5 - \lambda = 0$; 2, $5 - \lambda = 0.01$; 3, $5 - \lambda = 0.1$; 4, $5 - \lambda = 1$

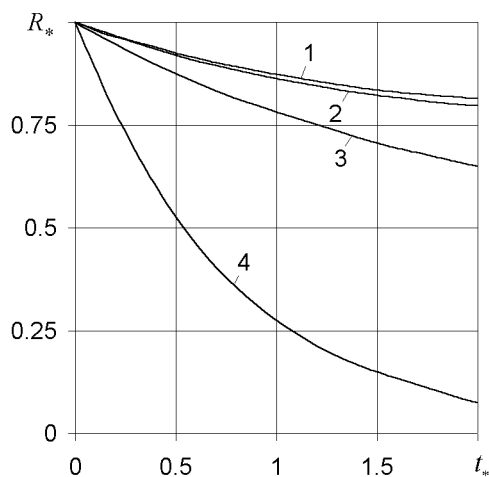


Рис. 11. Графики зависимости $R_*(t_*)$:

1 - $\lambda = 0$; 2 - $\lambda = 0.01$; 3 - $\lambda = 0.1$; 4 - $\lambda = 1$

решающим. По мере удаления от дрены, как видно из рис. 10, вклад переходных процессов становится менее существенным, что особенно заметно в зоне частичной деформации. Преобладание на графиках рис. 10 положительных значений U говорит о том, что скорость воды при понижающемся расходе Q в начальный период ($t \leq 0.1$) остается в диапазоне возможных значений действительной скорости при $Q = \text{const}$. С увеличением λ координаты точек, в которых U обращается в 0, смещаются влево. Это означает, что падение Q обуславливает ускоренное перемещение границы R_* между зонами с подвижными и взвешенными суффозионными частицами. В целом характер такого перемещения ($t \leq 2$) иллюстрируется рис. 11, на котором изображены кривые $R_* = R(t_*)$ при $\lambda = 0$ ($Q = \text{const}$) и $\lambda = 0.01 \dots 1$ ($Q = Q(t)$). Очевидное

ускорение движения границы между зонами имеет место при $\lambda \geq 0.1$, что отражается на интенсивности выноса частиц и степени деформации грунта. Судить же о состоянии грунта, устойчивости его структуры предпочтительнее, основываясь на данных вычислений концентрации частиц второй фракции в области деформаций. Профили концентрации таких частиц $n_c(R)$, в частности, показаны на рис. 12 для двух моментов времени ($t = 0.1$ и 1). Первый момент отвечает начальному периоду развития суффозионного процесса, а второй скорее относится к завершающему периоду, когда большая часть неструктурных частиц из указанной области уже вынесена. Первоначально грунт деформируется при $0 \leq \lambda \leq 1$ сходным образом, о чем свидетельствует практическое совпадение начальных профилей $n_c(R)$ для всех рассмотренных значений λ в зоне полной деформации (на рис. 12 соответствующие профили изображены одной кривой 1). Видимые отличия имеют место только при больших значениях R и объясняются разной скоростью перемещения границы между зонами. Со временем влияние переходных процессов на форму профилей $n_c(R)$ растет и к моменту $t = 1$ становится очевидным при $\lambda > 0.1$, причем в обеих выделенных зонах. Если расход Q при $t \rightarrow \infty$ стремится к некоторому конечному значению ($\beta > 0$), то диапазон изменения Q по сравнению с предельным случаем $\beta = 0$ сужается и влияние переходных процессов в дрене на суффозионный процесс должно ослабевать. Действительно, как легко убедиться из рис. 12, 13, различия между профилями $n_c(R)$ при $\beta = 0$ и $\beta > 0$ нарастают с увеличением β , достигая максимума при $\beta = 1$. Кривые 5 - 7 на рис.12 и 6 - 8 на рис. 13 характеризуют количество взвешенных частиц в зоне частичной деформации на соответствующие моменты времени. Для их последующего удаления из грунта необходимо усилить осушающее действие дренажа. В случае постоянного или падающего расхода Q формы указанных кривых не меняются, но сами кривые неограниченно долго удлиняются. И только в стационарных условиях распределения концентрации взвешенных частиц принимают окончательный вид. Кривые таких распределений рассчитаны для основных вариантов сочетания λ , β и приведены на рис. 14. Именно эти кривые, дополненные отрезками прямой $n_c = 0$ в пределах зоны полной деформации, представляют собой стационарные концентрационные профили. Из рис. 14 видно, что с увеличением показателя λ протяженность зоны частичной деформации и содержание сохранившихся в области деформаций суффозионных частиц возрастает, а с увеличени-

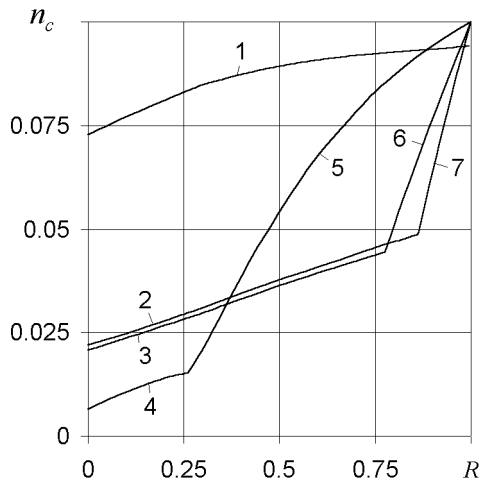


Рис. 12. Профили концентрации суффозионных частиц в области деформаций $n_c(R)$:
 1 и 5; 1 и 6; 1 и 7 - $t = 0.1$;
 2 и 5; 3 и 6; 4 и 7 - $t = 1$;
 1, 2 - $\lambda = 0.01$; 1, 3 - $\lambda = 0.1$; 1, 4 - $\lambda = 1$

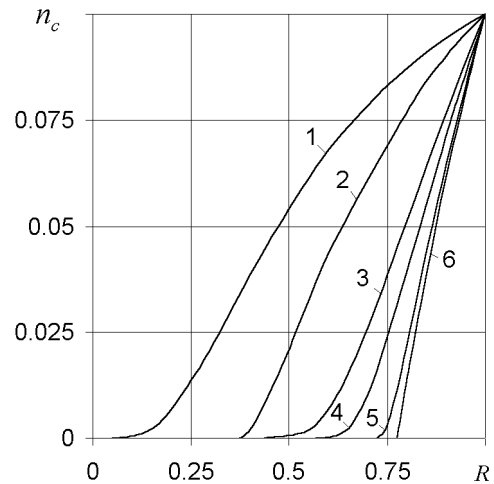


Рис. 14. Стационарные профили концентрации суффозионных частиц:
 1 - $\lambda = 1$; $\beta = 0$; 2 - $\lambda = 1$; $\beta = 0.5$;
 3 - $\lambda = 0.1$; $\beta = 0$; 4 - $\lambda = 0.1$; $\beta = 0.5$;
 5 - $\lambda = 0.01$; $\beta = 0$; 6 - $\lambda = 0$

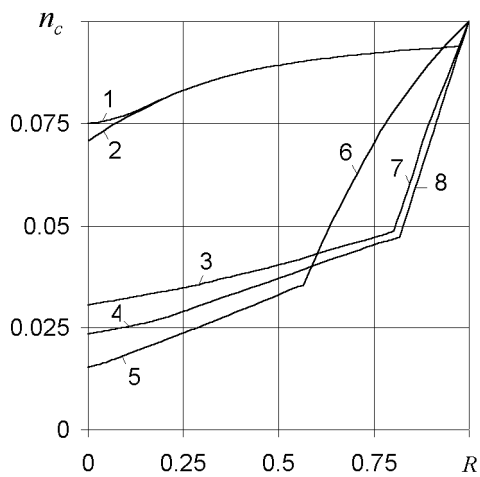


Рис. 13. Профили концентрации суффозионных частиц $n_c(R)$:
 1 и 7 - $t = 0.1$; $\lambda = 0.1$; $\beta = 0.5$;
 1 и 8 - $t = 0.1$; $\lambda = 0.1$; $\beta = 0.2$;
 2 и 6 - $t = 0.1$; $\lambda = 1$; $\beta = 0.5$;
 3 и 7 - $t = 1$; $\lambda = 0.1$; $\beta = 0.2$;
 4 и 8 - $t = 1$; $\lambda = 0.1$; $\beta = 0.5$;
 5 и 6 - $t = 1$; $\lambda = 1$; $\beta = 0.5$

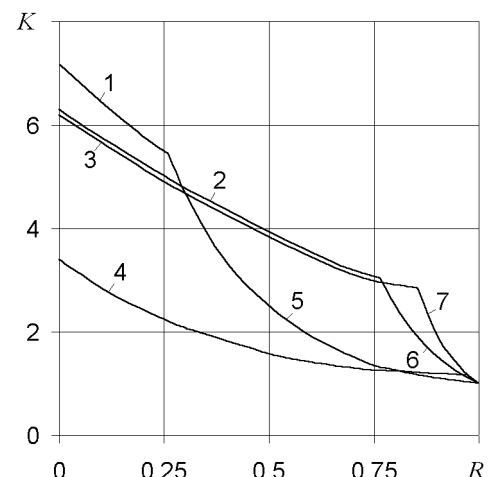


Рис. 15. Профили относительной проницаемости $K(R)$:
 4 и 5; 4 и 6; 4 и 7 - $t = 0.1$;
 1 и 5; 2 и 6; 3 и 7 - $t = 1$;
 1, 4 и 5 - $\lambda = 1$; 2, 4 и 6 - $\lambda = 0.1$;
 3, 4 и 7 - $\lambda = 0.01$

ем β наблюдается обратная картина. Но существенными такие изменения оказываются только при $\lambda > 0.01$.

Относительное увеличение проницаемости грунта, обусловленное наряду с выносом частиц второй фракции также и переходными процессами в дрене, определялось на моменты времени $t = 0$ и 1 (рис. 15). Расчеты профилей $K(R)$ выполнялись по формуле (35) с учетом полученных выше распределений $u(R)$, $n_c(R)$ при $\beta = 0$ и $\lambda = 0.01, 0.1$ и 1 . В начальный период переформирования филь-

трационного режима под действием суффозии показатель λ слабо влияет на величину K . Однако уже при $t = 1$ такое влияние оказывается существенным особенно в зоне частичной деформации (кривые 5 - 7), на что указывают значительные различия в содержании взвешенных частиц при заданных значениях λ (рис. 14). Характер изменения величины K в обеих зонах области деформаций также заметно отличается, что связано с особенностями фильтрации и массопереноса в этих зонах. Поэтому каждый из указанных профилей $K(R)$ фактически состоит из двух кривых, описы-

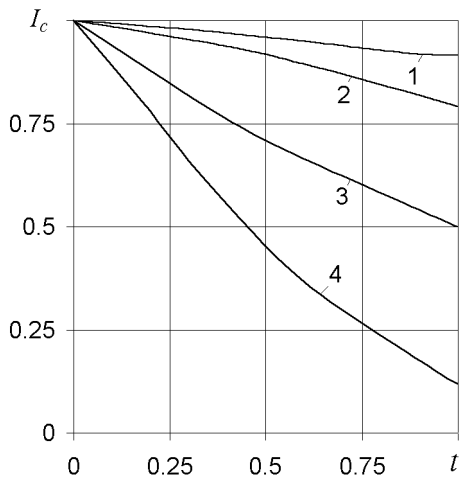


Рис. 16. Відносний витрат частин в вихідному сеченні ($r = r_0$):
 1 – $\lambda = 0.1$; $\beta = 0.5$; 2 – $\lambda = 0.1$; $\beta = 0$;
 3 – $\lambda = 1$; $\beta = 0.5$; 4 – $\lambda = 1$; $\beta = 0$

ваючих поведінку K в зонах розділено, но имеющих общее значение K на границе зон ($R = R_*$). В целом рост коэффициента k при переменном Q несколько меньший, чем при $Q = \text{const}$, и тем не менее достаточный для констатации необходимости оценивать трансформацию фильтрационного режима вблизи дрены в реальных суффозионных грунтах. Существенность переходных процессов в дрене для суффозии при $\lambda \leq 0.1$ подтверждается и данными расчетов относительной интенсивности выноса частиц грунта I_c , приведенными на рис. 16. Относительная величина I_c находится путем сопоставления потоков твердых частиц на дрене при ее переменном и постоянном расходах (начальные расходы совпадают). Закономерно, что при $t = 1$ и $\beta = 0$, $\lambda = 1$ интенсивность I_c уменьшается на порядок (кривая 4), причем подвижных частиц в зоне полной деформации к этому времени остается всего около 3% (рис. 12) от их исходного количества в области деформаций. Вообще, судя из рис. 16, приток неструктурных частиц к дрене оказывается весьма чувствительным к ее расходным параметрам β и λ . Таким образом, для достоверного расчета фильтрационного и суффозионного процессов на фоне дренажа важно учитывать и начальное, и стационарное значения его расхода, характерное время переходных процессов в дрене.

ВЫВОДЫ

1. Суффозионные грунты расположены в Украине преимущественно в северо-западных районах, в Белоруссии, России. Часто механическая суф-

фозия инициируется дренажем, развиваясь вследствие возникновения локальных неоднородностей в фильтрационном течении, и представляет для него весьма серьезную опасность. Прежде всего, поступление в дрены большого количества частиц грунта и их накопление в дренажной или водопроводящей сетях является причиной заиливания указанных элементов дренажных систем. Также уменьшение содержания твердых частиц вблизи дрены и в результате увеличение пористости грунта приводят к снижению его прочности, что способствует проседанию грунта и ухудшению фильтрационных свойств на наиболее ответственном участке фильтрационного потока.

2. Область фильтрационных деформаций примыкает к дрене и имеет протяженность, определяемую ее начальным расходом. Состоит указанная область из двух зон – полной и частичной деформации. В зоне полной деформации суффозионные частицы подвижны и транспортируются к дрене фильтрационным потоком со скоростью, меньшей скорости воды на величину критической скорости. В зоне частичной деформации скорость воды равна критической скорости, поэтому такие частицы находятся во взвешенном состоянии, оставаясь в ней неограниченно долго. Граница между этими зонами перемещается со скоростью, которая тесно связана с режимом работы дренажа.

3. Дренаж на практике работает в двух режимах – с постоянным и переменным расходом. Ускоренное понижение расхода ведет к сохранению в зоне частичной деформации большого количества суффозионных частиц (дополнительно десятки процентов от исходного состояния), а значит к уменьшению их выноса.

4. Выраженная неоднородность механического состава суффозионных грунтов, изменения во времени содержания и скорости частиц твердой фазы требуют соответствующих обобщений известных зависимостей между проницаемостью (коэффициентом фильтрации) и пористостью. В отсутствии пластических деформаций суффозионный процесс может обуславливать, как следует из модифицированной формулы Козени-Кармана, заметное (почти на порядок) увеличение коэффициента фильтрации около дрены (в области деформаций).

5. Непосредственно концентрация суффозионных частиц уменьшается в зоне полной деформации, причем основная их часть удаляется из грунта уже к моменту времени $t = 3$. Тем не менее полный вынос этих частиц из зоны возможен только через бесконечно большое время. В пределах указанной зоны понижение концентрации подвижных частиц носит почти равномерный характер. Рас-

пределение их концентраций во второй зоне формируется за счет перехода частиц из подвижного во взвешенное состояние на границе между зонами по мере ее перемещения.

6. Увеличение исходного содержания суффозионных частиц вызывает пропорциональное усиление их выноса. Содержание структурообразующих частиц оказывает заметно меньшее влияние на суффозионный процесс.

1. Мурашко А. И., Сапожников Е.Г. Защита дренажа от заиления.– Мн.: Ураджай, 1978.– 168 с.
2. Резников Г.Д. О поглощении частиц в фильтрах водопроводных очистных сооружений // ИФЖ.– 1999.– 72, N 1.– С. 38–42.
3. Corapcioglu M.Y., Wang S. Dual-porosity groundwater contaminant transport in the presence of colloids // Water Resour. Res.– 1999.– 35, 11.– P. 3261–3273.
4. Ren J., Packman A.J. Correlation of colloid collision efficiency with hydraulic conductivity of silica sands // Water Resour. Res.– 2000.– 36, 9.– P. 2493–2500.
5. Аникеев А.В., Артамонова Н.Б., Калинин Э.В. Некоторые особенности деформирования и разрушения массивов горных пород при техногенном изменении режима подземных вод // Геоэкология.– 2000.– N 3.– С. 249–256.
6. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов.– М.: Недра, 1980.– 272 с.
7. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидромеханики.– М.: Недра, 1974.– 296 с.
8. Shvidchenko A.B., Pender G. Flume study of the effect of relative depth on the incipient motion of coarse uniform sediments // Water Resour. Res.– 2000.– 36, 2.– P. 619–628.
9. Wilcock P.R., Mc Ardel B.W. Partial transport of a sand / gravel sediment // Water Resour. Res.– 1997.– 33, 1.– P. 235–245.
10. Farmer E.F. Relative detachability of soil particles by simulated rainfall // Soil Sci. Soc. Amer. Proc.– 1973.– 37, 4.– P. 629–633.
11. Hall D., Fitzpatrick C.S.B. A mathematical filter backwash model // Wat. Sci. Tech.– 1999.– 37, 12.– P. 371–379.
12. Mackie R.J., Zhao Q. A framework for modelling removal in the filtration of polydisperse suspensions // Wat. Res.– 1998.– 33, 3.– P. 794–806.
13. Miller D.W., Willardson L.S. Head loss at soil- drain envelope interfaces // J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE.– 1983.– 109, 2.– P. 211–220.
14. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость несвязных грунтов: формы проявления и основные закономерности // Геоэкология.– 1998.– N 3.– С. 34–54.
15. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов.– М.: Наука, 1967.– 270 с.
16. Алексеев В.С., Коммунар Г.М. Кольматаж фильтров и прифильтровых зон водозаборных скважин // Водн. ресурсы.– 1974.– N 5.– С. 170–174.
17. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии.– Л.: Химия, 1982.– 288 с.
18. Поляков В.С. О расчете микрофильтров объемного действия // Теор. основы хим. технол.– 1998.– 32, N 1.– С. 22–27.
19. Бомба А.Я., Хлапук М.М. Моделивання впливу градієнтів напору на процес фільтрації в середовищах, що деформуються // Волинський математ. вісник.– 1998.– Вип.5.– С. 26–35.
20. Никаньшин Д.П., Никифоров А.И. Моделирование переноса частиц различного размера двухфазным фильтрационным потоком // ИФЖ.– 2000.– 73, N 3.– С. 497–500.
21. Никифоров А.И. О моделировании суффозии водоносных пластов // ИФЖ.– 2000.– 73, N 5.– С. 979–985.
22. Хрисанов Н.И., Камбуров В.А. Математическое и физическое моделирование фильтрационных деформаций грунта при работе закрытого дренажа // Сб. статей.– М.: Колос.– 1973.– С. 345–353.
23. Бабій А.І. Дослідження суфозійних процесів у дренажній області залежно від градієнтів фільтрації // Меліор. і водне господарство.– 1994.– Вип.80.– С. 77–83.
24. Хлапук М.М., Яцик А.В., Івашенко А.П. Фізичне та математичне моделювання деформацій ґрунту в навікодренній зоні // Водне господарство України.– 1999.– N 1–2.– С. 36–38.
25. Lennox-Gratin Ch. Effect of envelopes on flow pattern near drain pipe // J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE.– 1989.– 115, 4.– P. 626–641.
26. Willardson L.S., Walker R.E. Synthetic drain envelope-soil interactions // J. Irrig. and Drain. Div., ASCE.– 1979.– 105, 4.– P. 367–373.
27. Хлапук М.М. Математичне моделювання процесу фільтрації в середовищах, де відбувається механічна суфозія // Гидромеліорація та гідротехнічне будівництво.– 1998.– Вип.23.– С. 92–98.
28. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод / Н.Н.Веригин.– М.: Колос, 1979.– 336 с.
29. Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян В.С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород.– М.: Наука, 1977.– 271 с.
30. Камке Э. Справочник по дифференциальным уравнениям в частных производных первого порядка.– М.: Наука, 1966.– 260 с.
31. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР(1917-1967).– М.: Наука, 1969.– 545 с.
32. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде.– М.: ГИТТЛ, 1953.– 616 с.
33. Scheidegger A.E. The physics of flow through porous media.– Toronto: University of Toronto Press, 1960.– 366 p.
34. Yucovic M., Soro A. Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain size composition.– Littleton, Colorado: Water Resources Publication, 1992.– 452 p.
35. Коваленко П.И., Яцык Н.В. Оптимизация уровня режима грунтовых вод на системах с двухсторонним регулированием водного режима почв // Повышение эффективности осушительно-увлажнительных систем.– К.: УкрНИИГиМ.– 1985.– С. 8–18.