

УДК 532.546

ПОДПОЧВЕННОЕ УВЛАЖНЕНИЕ НЕСВЯЗНЫХ НЕСУФФОЗИОННЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИСПАРЕНИЯ

В. Л. ПОЛЯКОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 23.01.2010

Сформулирована и строго решена математическая задача установившегося подпочвенного увлажнения несвязного несуффозионного грунта системой дрен (каналов) в условиях испарения с интенсивностью, зависящей от глубины грунтовых вод. Обосновано принятие постоянной вдоль фильтрационного потока скорости испарения. На многочисленных примерах показана существенность влияния переориентации частиц скелета на важнейшие фильтрационные характеристики, ее значимость для увлажнительного процесса.

Сформульовано і точно розв'язано математичну задачу усталеного підгрунтового зволоження незв'язного несуффозійного ґрунту системою дрен (каналів) в умовах випаровування з інтенсивністю, яка залежить від глибини ґрунтових вод. Обґрунтовано прийняття сталою вздовж фільтраційного потоку швидкості випаровування. На багаточисленних прикладах показано суттєвість впливу переорієнтації часток скелету на важливі фільтраційні характеристики, її значущість для зволожувального процесу.

A mathematical task has been stated and exactly solved of steady - state wetting by drain system of noncohesion nonsuffosion soil at evapotranspiration with intensity depending on water table depth. The assumption of constant evapotranspiration rate along groundwater flow has been substantiated. Effect of structural particles re-orientation has been studied on hydraulic characteristics and its significance has been showed for wetting process.

ВВЕДЕНИЕ

При обычно нестабильных на протяжении вегетационного периода метеоусловиях водно-физические условия на сельскохозяйственных землях нередко оказываются неблагоприятными для роста и развития культур. Так, в засушливые периоды влагозапасы в почве могут чрезмерно срабатываться за счет длительной эвапотранспирации и для их пополнения применяются различные методы увлажнения. В случае несвязных грунтов, отличающихся обычно высокой проницаемостью, преимущественно реализуется подпочвенное увлажнение [1, 2]. Повышенный напор на системах дрен-увлажнителей (каналов) обеспечивает формирование фильтрационных потоков, распространяющихся в стороны от них и смыкающихся на междренях. При этом уровень грунтовых вод (УГВ) в каждом отдельно взятом междренном пространстве понижается по мере удаления от дрены вплоть до междренья, но растет со временем до тех пор, пока приток воды в грунт не уравнивается с суммарным испарением со свободной поверхности. В действительности, может наступить только квазиустановившееся состояние водного режима грунта, которое оправдано трактовать как стационарное с некоторыми оговорками и при котором УГВ плавно изменяется от одной дрены к другой, достигая низшей отметки посе-

редине между увлажнителями (рис. 1). Seriously complicates analysis of level regime due to nonlinearity of free surface and, as a consequence, variable character of evaporation rate along the filtration flow [3 – 5]. In practice calculations of meliorative drainage widespread received power-law forms of such dependence, according to which [6, 7]

$$\varepsilon_e = \varepsilon_{e0}(h - h_{kp})^\delta, \quad (1)$$

где ε_{e0} – коэффициент скорости суммарного испарения (эвапотранспирации); h – уровень грунтовых вод (напор); h_{kp} – критический уровень, при котором испарение грунтовых вод прекращается; δ – эмпирический коэффициент, принимающий для разных типов грунтов значения от 1 до 3. Prognosis of levels, substantiation of drainage parameters essentially complicate filtration deformations, arising under the action of increasing hydrodynamic force at wetting of noncohesion soils [8, 9].

In this work only non-suffosion soils, in which occur the indicated deformations of special type, representing themselves by re-orientation of skeleton particles of irregular shape along the flow. At this resistance of liquid from the solid phase is minimized, and, therefore, increases permeability (coefficient of filtration) of soil, moreover

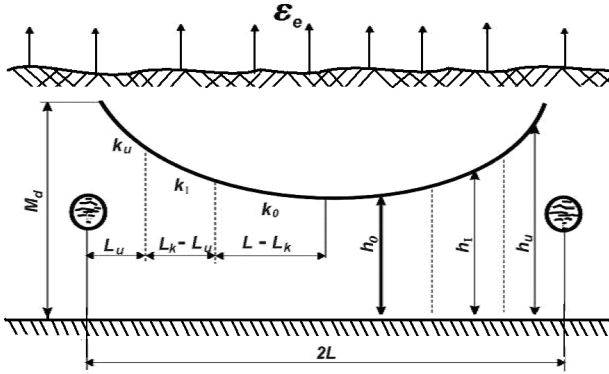


Рис. 1. Схема систематического увлажнительного дренажа в невязном несугфозионном грунте в условиях испарения

на наиболее ответственном участке фильтрационного течения.

1. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Опираясь на результаты экспериментальных исследований [10 – 12] и следуя рекомендациям [13], ниже для зависимости коэффициента фильтрации k от градиента напора I используется кусочно-линейная аппроксимация, так что

$$k = \begin{cases} k_0, & \text{при } I < I_k; \\ a + bI, & \text{при } I_k \leq I \leq I_u; \\ k_u, & \text{при } I_u < I. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь k_0 , k_u – коэффициенты фильтрации исходного и предельно деформированного грунта; I_k , I_u – критический и предельный градиенты напора, устанавливаемые опытным путем. Вследствие связи с принятой формой аппроксимации $k(I)$ в области движения в общем случае выделяются три характерные зоны. Во-первых, зона предельной деформации ($0 \leq x < L_u$), в которой все структурные частицы переориентированы и коэффициент k имеет постоянное максимальное значение k_u . Во-вторых, зона частичной деформации ($L_u \leq x \leq L_k$) с переменным коэффициентом k_I (от k_u до k_0). В третьих, зона недеформированного грунта ($L_k < x \leq L$) и, следовательно, $k = k_0$. Под L_u , L_k понимаются изначально неизвестные координаты границ между зонами предельной (первой) и частичной (второй) деформаций, второй и третьей зонами; $2L$ – расстояние между дренажами-увлажнителями. В принципе возможны условия, при которых область движения будет состоять из меньшего количества характерных

зон. Один из таких случаев также анализируется в статье, но основное внимание все-таки уделено изучению увлажнения грунта, в котором образуются все три вышеупомянутые зоны. Тогда исходная система стационарных уравнений фильтрации с учетом допущения о постоянстве испарения вдоль потока имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dx} \left(h_u \frac{dh_u}{dx} \right) - \frac{\epsilon_e(h_{0L})}{k_u} = 0, \quad 0 \leq x < L_u; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\left(a + b \frac{dh_I}{dx} \right) h_I \frac{dh_I}{dx} \right] - \epsilon_e(h_{0L}) = 0, \\ L_u \leq x \leq L_k; \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx} \left(h_0 \frac{dh_0}{dx} \right) - \frac{\epsilon_e(h_{0L})}{k_0} = 0, \quad L_k < x \leq L; \quad (5)$$

где h_u , h_I , h_0 , h_{0L} – напоры в первой, второй, третьей зонах и на междренье ($x = L$) соответственно. Следует заметить, что хотя скорость испарения ϵ_e вследствие изменения глубины грунтовых вод в междреннем пространстве зависит от x , но в постановке математической задачи считается постоянной и такой же, как на междренье. Подобное допущение оправдано из-за в целом слабой изогнутости свободной поверхности, а также тем, что внимание при расчетах подпочвенного увлажнения акцентируется на значениях фильтрационных характеристик посередине между дренажами, где водный режим более всего нуждается в регулировании. Указанное допущение будет обосновано ниже.

Оператор граничных условий в случае гидродинамического и конструктивного совершенства дренажа включает условия первого, второго и четвертого рода на внешних (створ дренажа и междренье) и внутренних границах области движения:

$$x = 0, \quad h_u = H_d; \quad x = L, \quad \frac{dh_0}{dx} = 0; \quad (6)$$

$$x = L_u, \quad h_u = h_I; \quad \frac{dh_u}{dx} = \frac{dh_I}{dx}; \quad (7)$$

$$x = L_k, \quad h_I = h_0; \quad \frac{dh_I}{dx} = \frac{dh_0}{dx}. \quad (8)$$

В дополнение к (6) – (8) задаются условия, предельнозначенные для нахождения неизвестных координат L_u , L_k :

$$x = L_u, \quad \frac{dh_u}{dx} = -I_u; \quad x = L_k, \quad \frac{dh_0}{dx} = -I_k. \quad (9)$$

С целью обобщения результатов теоретических исследований вводятся безразмерные переменные и параметры с использованием в качестве масштабов H_d , k_0 , L , $I_0 = H_d/L$.

Тогда $\bar{x} = x/L$, $\bar{h}_j = h_j/H_d$ ($j = u, I, 0$),
 $\bar{L}_{u,k} = L_{u,k}/L$, $\bar{I}_{u,k} = I_{u,k}/I_0$, $\bar{k}_u = k_u/k_0$,
 $\bar{\varepsilon}_e = \varepsilon_e/(k_0 I_0^2)$,

$$\bar{a} = 1 - \frac{\bar{k}_u - 1}{\bar{I}_u - \bar{I}_k} \bar{I}_k, \quad \bar{b} = \frac{1 - \bar{k}_u}{\bar{I}_u - \bar{I}_k},$$

и математическая задача (3) – (9) трансформируется таким образом:

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left(\bar{h}_u \frac{d\bar{h}_u}{d\bar{x}} \right) - \frac{\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})}{\bar{k}_u} = 0, \quad 0 \leq \bar{x} < \bar{L}_u; \quad (10)$$

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left[\left(\bar{a} + \bar{b} \frac{d\bar{h}_I}{d\bar{x}} \right) \bar{h}_I \frac{d\bar{h}_I}{d\bar{x}} \right] - \bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L}) = 0, \\ \bar{L}_u \leq \bar{x} \leq \bar{L}_k; \quad (11)$$

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left(\bar{h}_0 \frac{d\bar{h}_0}{d\bar{x}} \right) - \bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L}) = 0, \quad \bar{L}_k < \bar{x} \leq 1; \quad (12)$$

$$\bar{x} = 0, \quad \bar{h}_u = 1; \quad \bar{x} = 1, \quad \frac{d\bar{h}_0}{d\bar{x}} = 0; \quad (13)$$

$$\bar{x} = \bar{L}_u, \quad \bar{h}_u = \bar{h}_I; \quad \frac{d\bar{h}_u}{d\bar{x}} = \frac{d\bar{h}_I}{d\bar{x}}; \quad (14)$$

$$\bar{x} = \bar{L}_k, \quad \bar{h}_I = \bar{h}_0; \quad \frac{d\bar{h}_I}{d\bar{x}} = \frac{d\bar{h}_0}{d\bar{x}}; \quad (15)$$

$$\bar{x} = \bar{L}_u, \quad \frac{d\bar{h}_u}{d\bar{x}} = -\bar{I}_u; \quad \bar{x} = \bar{L}_k, \quad \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = -\bar{I}_k. \quad (16)$$

Ход решения задачи (10) – (16) в общих чертах описан в работе [14], где аналитическими методами строго решается аналогичная задача установившейся фильтрации, но в условиях инфильтрации. Вместе с тем имеется и ряд особенностей в связи с неопределенностью параметра $\bar{\varepsilon}_e$. Поэтому промежуточные выкладки опускаются и приводятся только основные результаты. В первую очередь получено выражение для относительного напора в зоне недеформированного грунта:

$$\bar{h}_0(x; \bar{h}_{0L}) = \\ = \sqrt{\bar{\varepsilon}_e(\bar{x} - 1)^2 + \left[\left(\frac{\bar{\varepsilon}_e}{\bar{I}_k} \right)^2 - \bar{\varepsilon}_e \right] (1 - \bar{L}_k)^2}. \quad (17)$$

Отсюда его значение на границе между второй и третьей зонами будет определяться как

$$\bar{h}_0(\bar{L}_k; \bar{h}_{0L}) = \frac{\bar{\varepsilon}_e}{\bar{I}_k} (1 - \bar{L}_k). \quad (18)$$

В зоне предельной деформации относительный напор описывается зависимостью

$$\bar{h}_u(\bar{x}; \bar{h}_{0L}) = \sqrt{\frac{\bar{\varepsilon}_e}{\bar{k}_u} (\bar{x} - 1)^2 + 1 - \frac{\bar{\varepsilon}_e}{\bar{k}_u}}, \quad (19)$$

и на границе со второй зоной имеет такое значение

$$\bar{h}_u(\bar{L}_u; \bar{h}_{0L}) = \sqrt{\frac{\bar{\varepsilon}_e}{\bar{k}_u} (\bar{L}_u^2 - 2\bar{L}_u) + 1}. \quad (20)$$

Наконец, получено уравнение, выражающее в неявной форме изменение относительного напора в зоне частичной деформации,

$$\bar{h}_I - \bar{h}_u(\bar{L}_u; \bar{h}_{0L}) \exp S_u(p(\bar{x}, h_j, \bar{h}_{0L})) = 0, \quad (21)$$

где

$$p = -\frac{\bar{a}}{2\bar{b}} - \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{2\bar{b}} \right)^2 + \frac{\bar{\varepsilon}_e(\bar{x} - 1)}{\bar{b}\bar{h}_I}},$$

$$S_u(p) = \int_{-\bar{I}_u}^p \frac{2\bar{b}\xi^2 + \bar{a}\xi}{\bar{b}\xi^3 + \bar{a}\xi^2 - \bar{\varepsilon}_e} d\xi.$$

Далее с привлечением первого условия (16) путем дифференцирования (20) выводится уравнение

$$\frac{\bar{\varepsilon}_e(1 - \bar{L}_u)}{\sqrt{\bar{k}_u^2 + \bar{\varepsilon}_e \bar{k}_u (\bar{L}_u^2 - 2\bar{L}_u)}} = \bar{I}_u,$$

из которого следует выражение для координаты \bar{L}_u :

$$\bar{L}_u(\bar{h}_{0L}) = 1 - \sqrt{\frac{\bar{k}_u \bar{I}_u^2 (\bar{k}_u - \bar{\varepsilon}_e)}{\bar{\varepsilon}_e^2 - \bar{k}_u \bar{I}_u^2 \bar{\varepsilon}_e}}. \quad (22)$$

Для нахождения координаты другой границы с использованием равенства значений функций \bar{h}_I и \bar{h}_0 на ней составляется уравнение

$$\bar{h}_0(\bar{L}_k) = \bar{h}_I(\bar{L}_k) = \bar{h}_u(\bar{L}_u) \exp S_u(-\bar{I}_k), \quad (23)$$

из которого вытекает искомое выражение

$$\bar{L}_k(\bar{h}_{0L}) = 1 - \frac{\bar{I}_k}{\bar{\varepsilon}_e} \bar{h}_u(\bar{L}_u) \exp S_u(-\bar{I}_k). \quad (24)$$

Неизвестным остается единственный параметр – \bar{h}_{0L} . Уравнение, позволяющее определять его простым подбором, легко получить из (17), если положить в нем $\bar{x} = 1$ и задействовать выражения (24) для $\bar{L}_k(\bar{h}_{0L})$, (21) для $S_u(-\bar{I}_k, \bar{h}_{0L})$, (20) для $\bar{h}_u(\bar{h}_{0L})$ и (22) для $\bar{L}_u(\bar{h}_{0L})$,

$$\bar{h}_{0L} - \frac{\bar{I}_k}{\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})} \sqrt{\left[\frac{\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})}{\bar{I}_k} \right]^2 - \bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})} \times \\ \times \bar{h}_u(\bar{L}_u(\bar{h}_{0L}), \bar{h}_{0L}) \exp S_u(-\bar{I}_k, \bar{h}_{0L}) = 0. \quad (25)$$

После установления с помощью выражения (25) значения \bar{h}_{0L} становится возможным вычисление конкретных значений всех характеристик, в том числе распределения напора в области движения

по формулам (17), (19), (21), профили относительного коэффициента фильтрации в зоне частичной деформации по формуле

$$\bar{k}_I = \frac{\bar{a}}{2} + \sqrt{\frac{\bar{a}^2}{4} - \bar{b} \frac{\bar{\varepsilon}_e (1 - \bar{x})}{\bar{h}_I(\bar{x})}}. \quad (26)$$

Для оценки эффекта деформаций второго типа при подпочвенном увлажнении несупфозионного грунта при стабильном испарении со свободной поверхности вводится специальный параметр G ,

$$G = \frac{h_{0L} - h_{L0}}{h_{L0}}, \quad (27)$$

где h_{0L} – уровень (напор) на междренье в недеформированном грунте.

В последующих расчетах примеров принимается линейный закон испарения:

$$\bar{\varepsilon}_e = \bar{\alpha} \bar{h}_{0L} - \bar{\beta}, \quad \bar{\varepsilon}_e = \bar{\alpha} \bar{h}_{L0} - \bar{\beta}, \quad (28)$$

где

$$\bar{\alpha} = \frac{\varepsilon_{e0} L^2}{k_0 H_d (M - h_{kp})},$$

$$\bar{\beta} = \frac{\varepsilon_{e0} h_{kp} L^2}{k_0 H_d^2 (M - h_{kp})},$$

M – мощность водоносного слоя.

Тогда \bar{h}_{L0} определяется путем решения аналогичной задачи для недеформированного грунта:

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left(\bar{h} \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} \right) - \bar{\alpha} \bar{h}_{0L} + \bar{\beta} = 0,$$

$$\bar{x} = 0, \quad \bar{h} = 1; \quad \bar{x} = 1, \quad \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = 0.$$

В итоге для относительного напора \bar{h} получено выражение

$$\bar{h} = \sqrt{1 + (\bar{\alpha} \bar{h}_{L0} - \bar{\beta})(\bar{x}^2 - 2\bar{x})}. \quad (29)$$

Искомая же величина \bar{h}_{L0} находится из квадратного уравнения

$$\bar{h}_{0L}^2 + \bar{\alpha} \bar{h}_{L0} - \bar{\beta} - 1 = 0$$

и будет

$$\bar{h}_{L0} = -\frac{\bar{a}}{2} + \sqrt{\frac{\bar{a}^2}{4} + 1 + \bar{\beta}}. \quad (30)$$

Принятое упрощенное представление для зависимости ε_e от глубины УГВ в форме (28) несколько занижает его истинную величину вблизи увлажнителей, где грунтовые воды находятся ближе к

поверхности земли. Для оценки погрешности, вносимой в расчеты допущением относительно испарения, получено также строгое решение этой задачи, но с учетом переменности ε_e , т. е. $\bar{\varepsilon}_e = \bar{\alpha} \bar{h} - \bar{\beta}$. Прежде всего выполняется замена переменных

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = y(\bar{h}).$$

Тогда исходное уравнение преобразуется к виду

$$\bar{h} y \frac{dy}{d\bar{h}} + y^2 = \bar{\alpha} \bar{h} - \bar{\beta}.$$

Затем делается замена $\varphi = y^2$, с учетом которой задача трансформируется таким образом:

$$\frac{d\varphi}{d\bar{h}} + \frac{2}{\bar{h}} \varphi = 2 \left(\bar{\alpha} - \frac{\bar{\beta}}{\bar{h}} \right),$$

$$\bar{x} = 0, \quad \bar{h} = 1; \quad \varphi = y_0^2 = \left[\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} \right]^2;$$

$$\bar{x} = 1, \quad \bar{h} = \bar{h}_{L0}; \quad y = \varphi = 0.$$

Решение этой задачи выражается зависимостью

$$\varphi = \frac{2}{\bar{h}^2} \left(\bar{\alpha} \frac{\bar{h}^3 - \bar{h}_{L0}^3}{3} - \bar{\beta} \frac{\bar{h}^2 - \bar{h}_{L0}^2}{2} \right).$$

Поскольку

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = -\frac{1}{\bar{h}} \sqrt{\frac{2\bar{\alpha}}{3} (\bar{h}^3 - \bar{h}_{L0}^3) - \bar{\beta} (\bar{h}^2 - \bar{h}_{L0}^2)},$$

то в окончательном виде связь между \bar{x} и \bar{h} , \bar{h}_{L0} представляется в интегральной форме

$$\bar{x} = Y(\bar{h}, \bar{h}_{L0}) =$$

$$= -\int_1^{\bar{h}} \frac{\xi d\xi}{\sqrt{\frac{2\bar{\alpha}}{3} (\xi^3 - \bar{h}_{L0}^3) - \bar{\beta} (\xi^2 - \bar{h}_{L0}^2)}}, \quad (31)$$

а искомое точное значение \bar{h}_{0L} находится также путем подбора из уравнения

$$\int_1^{\bar{h}_{L0}} \frac{\xi d\xi}{\sqrt{\frac{2\bar{\alpha}}{3} (\xi^3 - \bar{h}_{L0}^3) - \bar{\beta} (\xi^2 - \bar{h}_{L0}^2)}} = -1. \quad (32)$$

Для возникновения и развития рассматриваемых деформаций необходимо, чтобы в увлажняемом несвязном грунте сложились определенные водно-физические условия. Формально, если

$$\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L}) > \bar{I}_k, \quad (33)$$

то гарантирована переориентация частиц скелета, по крайней мере, в непосредственной близости от дрены. Если же

$$\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L}) > \bar{k}_u \bar{I}_u, \quad (34)$$

то обязательно образуется зона предельной деформации. Нередко, однако, $\bar{\varepsilon}_e$ оказываются меньше $\bar{k}_u \bar{I}_u$ и тогда возникает характерная ситуация, когда имеет место лишь частичное упорядочение структуры грунта. Ввиду отсутствия предельных деформаций отпадает необходимость в использовании уравнения (10) и условий (14). Решение упрощенной подобным образом математической задачи прежде всего выражается для функций-напоров \bar{h}_0, \bar{h}_I формулой (17) и уравнением

$$\bar{h}_I - \bar{h}_0(\bar{L}_k; \bar{h}_{0L}) \exp[-S_k(p(\bar{x}, h_I; \bar{h}_{0L}))] = 0, \quad (35)$$

где

$$S_k(p) = \int_p^{-\bar{I}_k} \frac{2\bar{b}\xi^2 + \bar{a}\xi}{\bar{b}\xi^3 + \bar{a}\xi^2 - \bar{\varepsilon}_e} d\xi.$$

Для определения координаты \bar{L}_k как функции от \bar{h}_{0L} привлекаются условие на дрене (13) и выражение относительного напора (18). Тогда из уравнения (35) следует, что

$$\bar{L}_k(\bar{h}_{0L}) = 1 - \frac{\bar{I}_k}{\bar{\varepsilon}_e} \exp[-S_k(p_0(\bar{h}_{0L}))], \quad (36)$$

где

$$p_0(\bar{h}_{0L}) = -\frac{\bar{a}}{2\bar{b}} - \sqrt{\left(\frac{\bar{a}}{2\bar{b}}\right)^2 - \frac{\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})}{\bar{b}}}.$$

Теперь в выражении (17) достаточно положить $\bar{x} = 1$, чтобы с учетом (36) составить уравнение относительно единственной неизвестной \bar{h}_{0L} :

$$\bar{h}_{0L} - \frac{\bar{I}_k}{\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})} \sqrt{\left[\frac{\bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})}{\bar{I}_k}\right]^2 - \bar{\varepsilon}_e(\bar{h}_{0L})} \times \exp[-S_k(p_0(\bar{h}_{0L}))] = 0. \quad (37)$$

Знание уровня \bar{h}_{0L} благодаря решению (37) позволяет, во-первых, вычислить \bar{L}_k по формуле (36), во-вторых, $\bar{h}_I(\bar{x})$ по (35), \bar{h}_0 по (17) и, в-третьих, принимая во внимания (30), параметр приращение УГВ на междренье G по формуле (27).

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Основные формулы, вытекающие из решения исходной задачи, использовались при расчетах ряда примеров подпочвенного увлажнения несвязного грунта в деформированном и недеформированном состоянии. Предметом вычислений стали коэффициент фильтрации и УГВ, причем, главным образом, его положение посередине между увлажнителями, где эффект увлажнения оказывается наиболее слабым. Разная степень упорядочения структуры грунта характеризовалась набором значений $k_u(2, 1.5, 1.25, 1)$. В последнем случае деформации отсутствуют, а отвечающие ему значения уровня на междренье и в целом свободную поверхность оправдано рассматривать как контрольные. Сравнение последних с аналогичными величинами в деформированном грунте с помощью параметра G наглядно демонстрирует значимость переориентации несферических структурных частиц для увлажнительного процесса. Было зафиксировано значение градиента $\bar{I}_u(0.5)$, а величина \bar{I}_k или считалась постоянной (0.2), или пробежала определенный интервал, оставаясь, естественно, меньше \bar{I}_u . Критическая глубина h_{kp} совпадала с мощностью водоносного слоя, так что $\beta = 0$. Коэффициент же \bar{a} в (28) изменялся от минимального расчетного \bar{a}_{min} , при котором адекватное суммарному испарению увлажнение еще не способно инициировать фильтрационные деформации, до $\bar{a} = 2$, когда интенсивный фильтрационный поток от увлажнителя обуславливает наряду с частичным также и предельное деформирование грунта.

В первую очередь рассчитывался УГВ фактически на всем междренном пространстве при $\bar{a} = 1.5$ и различных \bar{k}_u . Соответствующие им кривые напоров $\bar{h}_j(\bar{x}), \bar{h}(\bar{x})$ представлены на рис. 2. Принятые интенсивность испарения и напор на увлажнителях согласно формуле (30) обеспечивают в исходном грунте нахождение УГВ посередине между дренами на относительной глубине, равной половине действующего напора ($\bar{h}_{L0} = 0.5$). Как показали предварительные оценки, уже при $\bar{k}_u = 1.25$ выполняются условия (33), (34), что указывает на существование в области фильтрации всех трех характерных зон. Поэтому расчеты уровней в подобных ситуациях велись по формулам (17), (19), (21) при установленном согласно (25) значении \bar{h}_{0L} . При этом координаты внутренних границ находились по формулам (22), (24). В частности, при $\bar{k}_u = 1.25$ получено $\bar{L}_u = 0.315, \bar{L}_k = 0.864$. При последующем увеличении коэффициента \bar{k}_u в области деформаций сохраняется лишь зона частичной деформации, а минимальный в области движения относительный градиент (на дрене) ста-

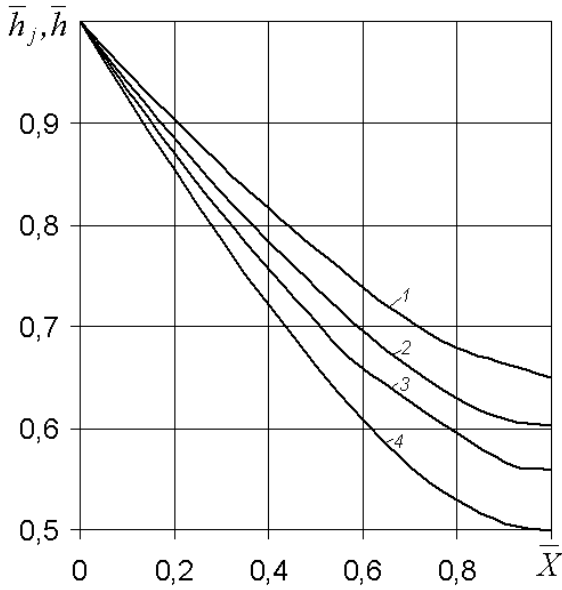


Рис. 2. Уровень грунтовых вод:
 1 – $\bar{k}_u = 2$; 2 – $\bar{k}_u = 1.5$; 3 – $\bar{k}_u = 1.25$; 4 – $\bar{k}_u = 1$

новится больше $-\bar{I}_u$. В серии примеров первая зона, как легко убедиться из (34), отсутствует при $\bar{k}_u = 2$ и для расчетов УГВ привлекаются формулы (35) – (37). Таким образом остается лишь одна внутренняя граница и $\bar{L}_k = 0.874$. Установлено, что даже незначительное увеличение \bar{k}_u (на 25%) способствует ощутимому приращению УГВ на междренье (на 12%), а двойное – приросту УГВ уже на 30%. Итак, можно заключить на основе расчетов уровней, что переориентация частиц скелета в состоянии существенно повлиять на уровенный режим увлажняемых несвязных грунтов.

Непосредственной причиной усиления фильтрационного процесса служит повышение проницаемости грунта около увлажнителей. Профили относительного коэффициента фильтрации рассчитывались при $\bar{k}_u = 2$, разных $\bar{\alpha}$ по формуле (26) и изображены на рис. 3. С увеличением $\bar{\alpha}$ и интенсификацией в связи с этим притока воды в грунт протяженность области деформаций растет. При меньших значениях $\bar{\alpha}$ (1, 1.5) имеют место только частичные деформации, а поскольку градиент напора на дренах не достигает $-\bar{I}_u$, то и максимальное значение \bar{k} меньше 2. Если же $\bar{\alpha} = 2$, то соответствующих скорости фильтрации, гидродинамической силы достаточно для максимального упорядочения структуры грунта вблизи дрены, а значит, образования зоны предельной деформации. Тогда профиль $\bar{k}_j(\bar{x})$ (кривая 1) состоит из трех фрагментов: первый – горизонтальный уча-

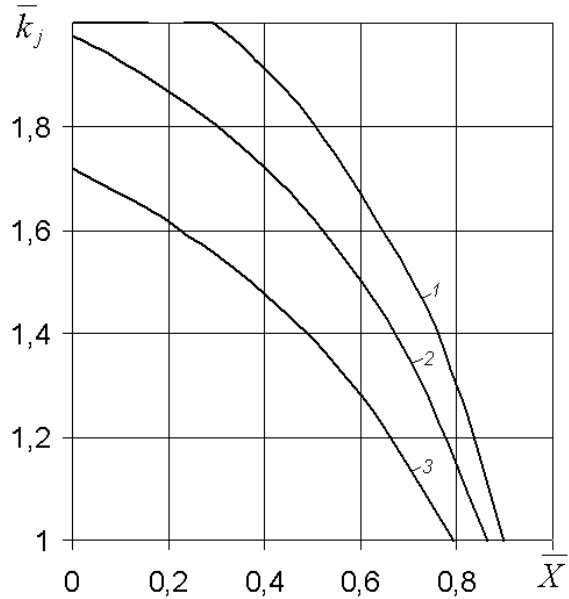


Рис. 3. Профили относительного коэффициента фильтрации:
 1 – $\bar{\alpha}_e = 2$; 2 – $\bar{\alpha}_e = 1.5$; 3 – $\bar{\alpha}_e = 1$

сток на интервале оси абсцисс от 0 до $\bar{L}_u = 0.293$; второй – криволинейный от \bar{L}_u до $\bar{L}_k = 0.898$ и третий – опять горизонтальный от \bar{L}_k до 1.

Большое внимание уделялось оценке эффективности деформаций на базе параметра G как функции от расходного ($\bar{\alpha}$) и деформационного (\bar{I}_k) параметров. Сначала в роли аргумента выступал коэффициент $\bar{\alpha}$, а предельный \bar{k}_u принимал последовательно значения 1.25, 1.5 и 2. Усиленное испарение приводило к значительным деформациям, что нашло отражение в быстром росте параметра G (рис. 4) и достижении им абсолютного максимума в примерах 0.447 при $\bar{k}_u = 2$, $\bar{\alpha} = 2$. Все кривые здесь начинаются из одной точки, лежащей на оси абсцисс. Ее положение устанавливается строго путем решения уравнения

$$\bar{\alpha} \left(\sqrt{\frac{\bar{\alpha}^2}{4} + 1 + \bar{\beta}} \right) + \bar{\beta} = \bar{I}_k,$$

и в данном случае $\bar{\alpha}$ составило примерно 0.2. В целом, кривые на рис. 4 подтверждают возможность серьезного влияния локальной анизотропии в деформированном грунте на пополнение в нем влагозапасов из системы увлажнителей. Наконец, анализировалась важность для увлажнительного эффекта критического градиента при дискретно менявшихся \bar{k}_u (1.25, 1.5, 2) и $\bar{\alpha}$ (1, 1.5, 2). Кривые $G(\bar{I}_k)$ на рис. 5 вычислялись в зависимости от

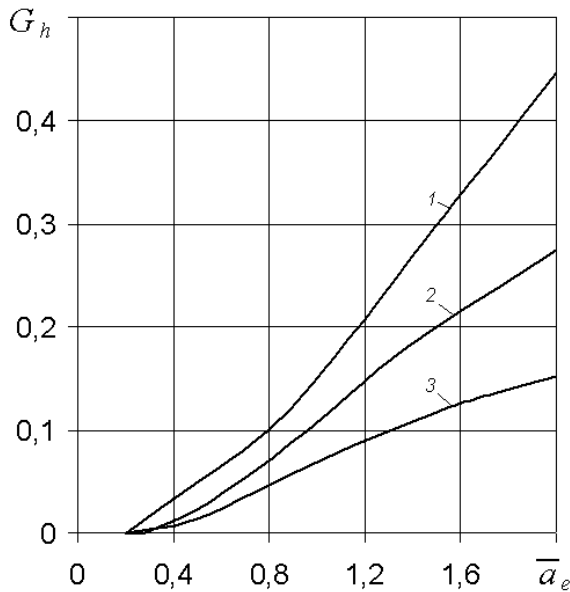


Рис. 4. Графики зависимости $G(\bar{a}_e)$:
1 - $\bar{k}_u = 2$; 2 - $\bar{k}_u = 1.5$; 3 - $\bar{k}_u = 1.25$

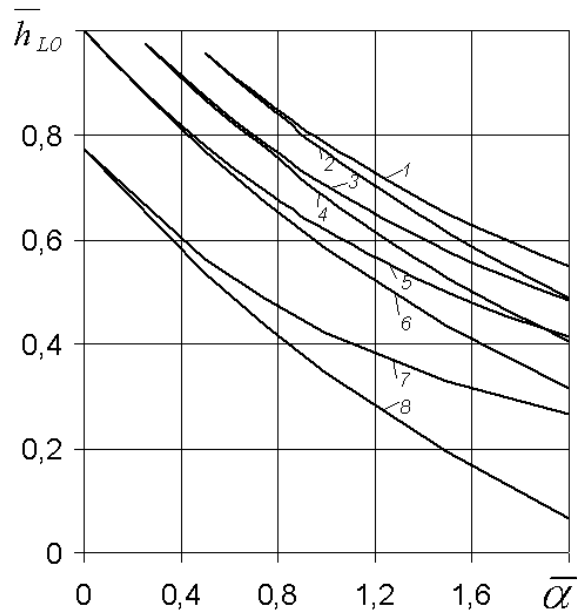


Рис. 6. Графики зависимости $\bar{h}_{LO}(\bar{\alpha})$:
1, 3, 5, 7 - пригл.; 2, 4, 6, 8 - точн.;
1, 2 - $\bar{\beta} = 0.4$; 3, 4 - $\bar{\beta} = 0.2$, 5, 6 - $\bar{\beta} = 0$;
7, 8 - $\bar{\beta} = -0.4$

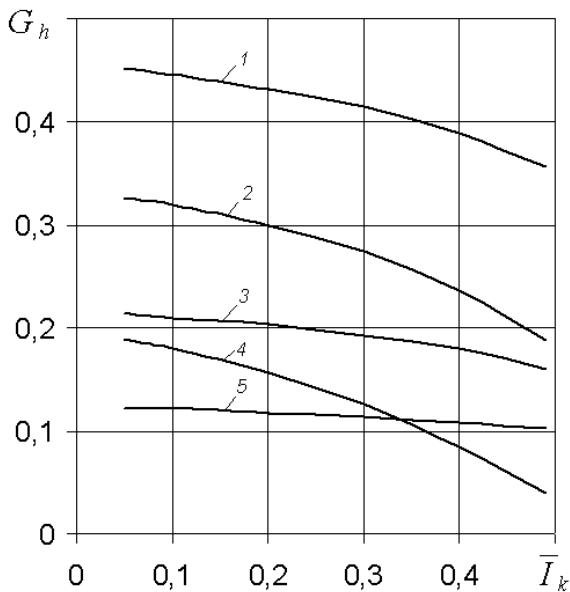


Рис. 5. Графики зависимости $G(\bar{I}_k)$:
1, 2, 4 - $\bar{k}_u = 2$; 3 - $\bar{k}_u = 1.5$; 5 - $\bar{k}_u = 1.25$;
1 - $\bar{a}_e = 2$; 2, 3, 5 - $\bar{a}_e = 1.5$, 4 - $\bar{a}_r = 1$

строения области фильтрации по различным формулам. Так, при $\bar{k}_u = 1.25, 1.5$ и $\bar{k}_u = 2$, $\bar{\alpha} = 2$ в соответствии с (34) наряду с частичными деформациями наблюдались и предельные (кривые 1, 3, 5). Тогда расчетными являлись формулы (27), (30) и

(25). В остальных случаях грунт деформировался не в полной мере и в расчетах вместо (25) использовалась формула (37). Влияние базового при моделировании фильтрационных деформаций параметра I_k на действие увлажнителей было значимым при существенной несферичности частиц скелета (кривые 1, 2, 4). Его гипотетическое уменьшение облегчало деформирование грунта и содействовало, таким образом, расширению области деформаций. При меньших \bar{k}_u изменение \bar{I}_k мало сказывалось на уровненом режиме увлажняемого грунта (кривые 3, 5).

И в завершение оценивалась погрешность, внесенная в фильтрационные расчеты принятием допущения о постоянстве испарения. С этой целью параллельно вычислялся УГВ на междуренье недеформированного грунта по приближенной (30) и точной (32) формулам, причем коэффициент $\bar{\alpha}$ менялся непрерывно от 0 до 2, а $\bar{\beta}$ - дискретно (-0.4, 0, 0.2, 0.4). Соответствующие кривые показаны на рис. 6. Так как $\bar{h} \leq 1$, то при наличии испарения $\bar{\alpha} > \bar{\beta}$. Если же $\bar{\alpha} = \bar{\beta}$, то испарение отсутствует, горизонтальная свободная поверхность находится на высоте 1. Рост коэффициента $\bar{\beta}$ означает уменьшение критической глубины и, как следствие, сокращение испарения и более высокое положение УГВ. Увеличение $\bar{\alpha}$ при неизменном $\bar{\beta}$ ведет к бо-

лее низкому УГВ, несмотря на меньшую критическую глубину. Вообще, заметное расхождение между приближенными и эталонными кривыми начинается только с $\bar{\alpha} = 1$, что характерно для особо засушливых периодов. Но и при максимальном для заданных условий значении $\bar{\alpha}$ такое расхождение оказывается не настолько большим, чтобы серьезно влиять на результаты выполненной выше оценки значимости деформаций для плоской безнапорной фильтрации с испарением, что и оправдывает упрощенный учет испарения.

ВЫВОДЫ

Длительное интенсивное суммарное испарение способно привести к существенному переосушению несвязных грунтов. Благоприятные водно-физические условия в таких грунтах поддерживаются в засушливые периоды за счет применения специальных методов увлажнения, среди которых широкое распространение на практике получило подпочвенное увлажнение. Создаваемый при этом повышенный напор на дренах-увлажнителях инициирует фильтрационный поток, а, следовательно, и гидродинамическую силу, которая нередко оказывается достаточной для переориентации частиц скелета неправильной формы вблизи дрена. При этом уменьшается сопротивление движению грунтовых вод и возрастает проницаемость грунта. В результате увеличивается дренажный расход и уровень грунтовых вод становится выше, чем в недеформированном грунте при аналогичных условиях. Вследствие кусочно-линейной аппроксимации экспериментальных данных относительно связи коэффициента фильтрации с градиентом напора в области движения целесообразно выделить две-три характерные зоны, в пределах которых грунт является предельно, частично деформированным и недеформированным. Обстоятельный сопоставительный анализ уровней грунтовых вод и коэффициента фильтрации для грунта в деформированном и недеформированном состоянии свидетельствует о возможном существенном влиянии упорядочения его структуры на увлажнительный процесс. Обоснованный учет этого фактора на стадии проектирования увлажнительных систем дает возможность увеличивать междренные расстояния и экономить таким образом капитальные вложения.

1. Маслов Б.С., Станкевич В.С., Черненко В.Я. Осушительно-увлажнительные системы. – М.: Колос, 1981. – 280 с.
2. Потоцкий Г.С., Лазарчук Н.А., Рокочинский А.Н. Мелиорация заболоченных засоленных пойм Среднего Приднепровья. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1987. – 120 с.
3. Духовный В.А., Баклушин М.Б., Томин Е.Д., Серебренников Ф.В. Горизонтальный дренаж орошаемых земель. – М.: Колос, 1979. – 255 с.
4. Харченко С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в нечерноземной зоне. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 239 с.
5. Шкиннис Ц.Н. Гидрологическое действие дренажа. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
6. Аверьянов С.Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. – М.: Колос, 1982. – 237 с.
7. Кац Д.М., Пашковский И.С. Мелиоративная гидрогеология. – М.: Агропромиздат, 1988. – 256 с.
8. Ojha C.S.P., Singh V.P., Adrian D.D. Determination of critical head in soil piping // J. Hydraul. Eng. – 2003. – 129, N 7. – P. 511–518.
9. Willardson L.S., Walker R.E. Synthetic drain envelope-soil interactions // J. Irrig. and Drain. Div., ASCE. – 1979. – V.105, N 4. – P. 367–373.
10. 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.
11. Дмитрієв Д.А. Про вплив градієнта напору на коефіцієнт фільтрації незв'язних ґрунтів // Вісник Укр. держ. акад. водн. Госп-ва. – Рівне: УДАВГ. – 1998. – Ч.2. – С. 23–27.
12. Хлапук М.М. Нові аспекти роботи дренажних конструкцій, виявлені за допомогою фізичного та математичного моделювання // Зб. статей за матеріалами 3-ої наук.-техн. конференції. Ч.2. Гідротехнічне будівництво. – Рівне: УДАВГ. – 1997. – С. 66–69.
13. Поляков В.Л. Фильтрационные деформации несвязных несугфозионных грунтов при установившейся одномерной безнапорной фильтрации // Доп. НАН України. – 2009. – 4. – С. 51–57.
14. Поляков В.Л., Желизко В.В. Расчет установившейся фильтрации к систематическому дренажу при наличии инфильтрации в несвязных несугфозионных грунтах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. – 2009. – Вип.12. – С. 114–124.