

УДК 532.546:628.35

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СУФФОЗИИ НА ДИНАМИКУ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОД

В. Л. ПОЛЯКОВ

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

Получено 23.03.2013

На протяжении трех стадий интенсивного промачивания суффозионного грунта последовательно исследовано аналитическими методами формирование и развитие аккумуляющего слоя при предельном его насыщении неструктурными частицами поверхностного слоя жидкости. На типичных примерах проанализировано влияние на деформационный и фильтрационный процессы подвижности и концентрации суффозионных частиц. Показано, что внутренняя суффозия способствует замедлению увлажнения и в конце концов может существенно ухудшить вертикальный водообмен в пласте.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: суффозионный грунт, аккумуляющий слой, вертикальный водообмен

На протязі трьох стадій інтенсивного промочування суфозійного ґрунту послідовно досліджено аналітичними методами формування і розвиток акумулюючого шару при граничному його насиченні неструктурними частками, поверхневого шару рідини. На типових прикладах проаналізовано вплив на деформаційний і фільтраційний процеси рухомості і концентрації суфозійних часток. Показано, що внутрішня суфозія сприяє уповільненню зволоження і в решті може суттєво погіршити вертикальний водобмін у пласті.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: суфозійний ґрунт, акумулюючий шар, вертикальний водобмін

Formation and development of accumulative layer at its ultimate saturation by non-structural particles, surface ponding has been sequentially studied during three stages of intensive liquid penetration into non-cohesive soil. Effect of non-structural particles mobility and concentration has been analyzed on deformation and infiltration processes. It has been shown, that internal piping caused deceleration of soil wetting and was possible to deteriorate essentially vertical liquid exchange at the end.

KEY WORDS: piping, accumulative layer, vertical liquid exchange

ВВЕДЕНИЕ

Одной из распространенных причин мобилизации неструктурных частиц в несвязных и слабосвязных грунтах является инфильтрация воды с поверхности земли [1, 2]. Источником инфильтрационного питания грунтовых вод, пополнения почвенных влагозапасов, возобновления ресурсов подземных вод часто становятся интенсивные атмосферные осадки и поливы с помощью дождевания или поверхностного увлажнения, вода из инфильтрационных бассейнов. Поступающая такими способами извне вода в течение относительно короткого времени частично или полностью отводится с поверхности земли благодаря ее просачиванию вниз [3–5]. При безуклонном рельефе местности, низкой проницаемости грунта, обильных осадках на его поверхности может сформироваться значимый слой воды, что ускоряет фильтрационный процесс [6–8]. Перераспределение воды из внешних источников между грунтом и поверхностным слоем (стоком) воды контролируется в таком случае коэффициентом фильтрации

пористой среды k . Для образования же указанного слоя и предельного насыщения пор среды необходимо, чтобы интенсивность притока воды к ее поверхности (скорость) I_w превосходила k . Естественно, что при $I_w \leq k$ вся такая вода сразу впитывается в грунт, причем при $I_w < k$ она движется, заполняя поровое пространство только частично (ненасыщенный поток). Если же $I_w \geq k$, то вода в нем фильтруется с полным заполнением пор (насыщенный поток). Насыщенное течение жидкости в пористых средах обычно удается описывать с помощью сравнительно простых и в физическом, и в математическом отношении моделей, особенно если оно имеет одномерный характер.

Интенсивная инфильтрация в несвязных грунтах часто инициирует внутреннюю суффозию [9–11]. Представленные ниже материалы теоретического анализа внутренней суффозии получены с целью оценки ее влияния на фильтрационный режим, а не наоборот. Поэтому подробное изучение инфильтрационного процесса, опираясь на сложные математические модели, в данной ситуации нецелесообразно и именно упрощенный подход к

его описанию на основе широко известной модели Грина–Ампта [12–16] таким образом оказывается оптимальным. Действительно, он позволяет, с одной стороны, в целом правильно отразить физическую сущность указанного процесса, а с другой – эффективно применять аналитические методы исследований. Кстати, высокая эффективность указанного подхода при решении разнообразных задач инфильтрации убедительно подтверждается сопоставлением соответствующей теории с экспериментальными данными [17, 18].

Следует подчеркнуть, что внутренняя суффозия при интенсивном увлажнении грунтов может не только быть причиной серьезных текущих изменений фильтрационных характеристик, но и иметь долговременные последствия для фильтрационного режима на значительных земельных участках. При смыкании инфильтрационных вод с грунтовыми скорость первых падает до докритических значений. Это приводит к почти мгновенному осаждению подвижных суффозионных частиц. И если их концентрация была достаточно высокой, то на месте аккумулирующей зоны образуется слабопроницаемая прослойка, затрудняющая вертикальный водообмен.

При заданной скорости инфильтрации ε перемещение фронта увлажнения в суффозионном грунте определяется только её величиной и исходной пористостью, а значит, не зависит от фильтрационных деформаций [19, 20]. Вместе с тем, потери напора в области фильтрации растут вследствие перераспределения неструктурных частиц. Так как напор на указанном фронте практически не меняется, то внутренняя суффозия способствует увеличению напора (уровня) на поверхности грунта H . На практике повышенный напор H обычно создается благодаря интенсивному притоку жидкости извне (осадки, поливы) и вследствие недостаточной фильтрационной способности грунта. Скорость такого притока I_w легко измеряется и поэтому может считаться известной. В то же время, скорость инфильтрации неизвестна и надежно находится, исходя из баланса поверхностных вод. Описывает его в отсутствии поверхностного стока следующее уравнение:

$$\frac{dH}{dt} = I_w - \varepsilon. \quad (1)$$

Совместное решение указанного уравнения с уравнениями фильтрации и массопереноса в грунте при соответствующих начальных и граничных условиях дает возможность отследить динамику уровня выше его поверхности, фронта увлажнения с учетом мобилизации суффозионной ком-

поненты его твердой фазы на всех трех стадиях общего инфильтрационного процесса (рис.1). В соответствии с [12, 21], первая стадия увлажнения заканчивается в момент прекращения притока воды из внешних источников ($I_w = 0$). Таким образом, на второй стадии она поступает в грунт при быстро сокращающемся объеме поверхностных вод. Эта стадия заканчивается и начинается последняя, когда уровень H полностью срабатывается. Третья стадия имеет большое практическое значение при увлажнительных мероприятиях на сельскохозяйственных землях, так как в это время происходит рациональное перераспределение влаги по почвенно-грунтовому профилю и, в частности, обеспечивается оптимальное содержание влаги в биологически активной части водоносной толщи благодаря гравитационному стеканию ее избытка. Поэтому ниже последовательно анализируется режим инфильтрации на фоне прогрессирующей механической суффозии в течение первой, второй и третьей стадий. Внимание акцентируется на изменениях фильтрационных характеристик, вызванных именно внутренней суффозией. Чтобы оценить их важность, привлекаются ряд известных и новых формул для расчета увлажнения суффозионных и несуффозионных грунтов, которые или учитывают максимальный и минимальный эффект от деформаций, или вообще их не учитывают.

Предметом детального рассмотрения здесь стала типичная и наиболее интересная в практическом отношении ситуация, которая складывается при совместном протекании интенсивной инфильтрации и внутренней суффозии в несвязных грунтах, а также при выполнении условия

$$\frac{\varepsilon(0)}{k_0} \geq \bar{m}_v I_k, \quad (2)$$

где принято, что $\varepsilon(t)$ является неубывающей функцией; k_0 – исходный коэффициент фильтрации; $\bar{m}_v = m_v/m_0$, m_v , m_0 – предельная и исходная объемные концентрации суффозионных частиц; I_k – критический градиент.

Для неё характерно предельное динамическое насыщение аккумулирующей зоны суффозионными частицами ($m = m_v$) на протяжении всего периода увлажнения (трёх стадий). Другие возможные сценарии увлажнения являются не такими показательными и намного сложнее для теоретических и экспериментальных исследований. Поэтому выбор сделан в пользу третьего сценария, и поочередно изучаются аналитическими методами физико-механические процессы на трех стадиях увлажнения. Завершается инфильтрационный

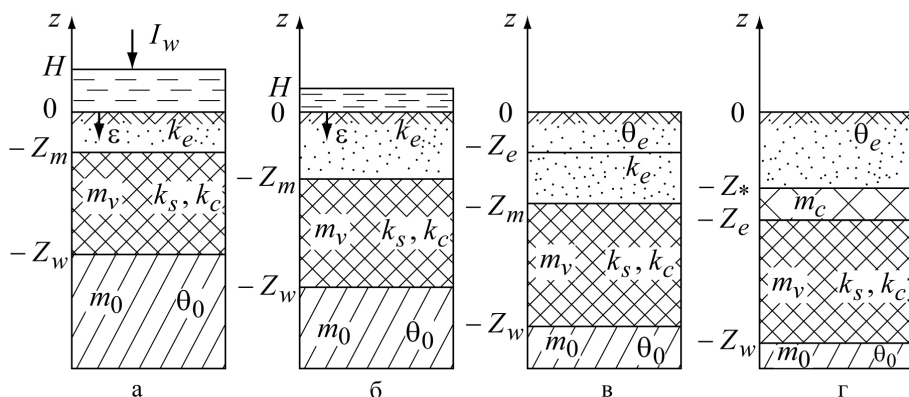


Рис. 1. Схемы инфильтрации воды в суффозионный грунт:
 а – первая стадия, б – вторая стадия, в, г – третья стадия

процесс или на третьей стадии после перехода всей поступившей в грунт воды в связанное состояние, или на любой стадии при контакте фронта увлажнения с водоупором, грунтовыми водами. В это время может произойти массовая иммобилизация подвижных частиц и таким образом на месте достигнутой конечного положения области фильтрации (увлажнения) образоваться слой с повышенным содержанием мелких частиц. Если же концентрация m_v существенно больше исходной m_0 , то указанный слой окажется слабопроницаемым и в дальнейшем станет серьёзным препятствием для вертикального водообмена.

Вообще основополагающая математическая модель увлажнения суффозионного грунта состоит из двух блоков – деформационного и фильтрационного. Полная формулировка первого блока дана в работе [19]. Также в нем представлено точное решение соответствующей задачи массопереноса при заданной функции интенсивности инфильтрации $\varepsilon(t)$, которое обеспечивает исчерпывающую информацию об аккумуляционной зоне – её размерах, положении, степени и динамике насыщения неструктурными частицами с выделением трех характерных фаз. Полученные подобным образом данные для третьей фазы (предельное насыщение грунта указанными частицами) используются дальше в качестве исходной информации для фильтрационного блока. Последний прежде всего включает уравнение фильтрации в верхней зоне области увлажнения (содержатся только частицы скелета), которое из-за отсутствия суффозионных частиц имеет простейший вид:

$$\frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2} = 0, \quad -Z_m \leq z \leq 0, \quad (3)$$

а также уравнение движения жидкости в нижней, аккумуляционной зоне (сосредоточены все суффозионные частицы из увлажненного грунта):

$$(1 - m_s - m) \left(\frac{u_a}{k_s} + \frac{u_k}{k_c} \right) = \frac{\partial h_a}{\partial z}, \quad -Z_w \leq z \leq -Z_m. \quad (4)$$

Здесь h_e , h_a – напоры в соответствующих зонах; u_a – средняя скорость воды в порах аккумуляционной зоны; u_k – критическая скорость; k_s , k_c – аналоги коэффициента фильтрации в системе "жидкость-скелет" и "жидкость-неструктурное вещество" в присутствии неструктурной и структурной компонент грунта соответственно. Общие граничные условия на первой и третьей стадиях будут

$$z = -Z_w, \quad h_a = -Z_w - z_{wa}; \quad (5)$$

$$z = -Z_m, \quad h_a = h_e; \quad (6)$$

где z_{wa} – корректив для учета капиллярных сил на фронте увлажнения. Остальные элементы математической задачи увлажнения для трех стадий различаются.

Первая стадия (рис. 1, а). Функция напора h_e определена на интервале $-Z_m \leq z \leq 0$. На поверхности грунта принимается условие

$$z = 0, \quad h_e = H. \quad (7)$$

Условие сопряжения фильтрационных потоков при $z = -Z_m$ дает возможность связать скорость u_a с ε и m , а именно,

$$u_a = \frac{\varepsilon + u_k m}{1 - m_s}. \quad (8)$$

Наконец, начальные условия допускают наличие поверхностного слоя воды глубиной H_0 и будут

$$t = 0, \quad H = H_0; \quad Z_w = 0. \quad (9)$$

Пусть теперь условие (2) справедливо и, следовательно, увлажнение, суффозия развиваются по третьему сценарию. Поскольку в аккумулярующей зоне с момента её формирования имеет место предельно возможная в динамических условиях концентрация неструктурного вещества m_v , то скорость u_a здесь может меняться только со временем. Поэтому напоры h_e , h_a являются следующими линейными функциями от z :

$$h_e = H + \left\{ H + z_{wa} + Z_w - n_v \left[\frac{\varepsilon + u_k m_v}{k_s (1 - m_s)} + \frac{u_k}{k_c} \right] (Z_w - Z_m) \right\} \frac{z}{Z_m}, \quad (10)$$

$$h_a = -z_w - z_{wa} + n_v \left[\frac{\varepsilon + u_k m_v}{k_s (1 - m_s)} + \frac{u_k}{k_c} \right] (z + Z_w), \quad (11)$$

где $n_v = 1 - m_s - m_v$. Закономерности снижения границ аккумулярующей зоны определяются на основе условий баланса жидкости и суффозионных частиц по формулам

$$Z_w = \frac{I_w t - H + H_0}{n_0 - \theta_0}, \quad (12)$$

$$Z_m = \frac{(m_v - m_0) (I_w t - H + H_0)}{m_v (n_0 - \theta_0)}, \quad (13)$$

где n_0 – пористость недеформированного грунта; θ_0 – его исходная влажность, которая колеблется в широких пределах, но при этом обычно низкая и значительно меньше, например, капиллярной, полевой влагемкостей. Так как на поверхности грунта ($z = 0$)

$$\varepsilon = k_e \frac{\partial h_e}{\partial z},$$

то с использованием формул (10) и (12), (13) ε удастся выразить через H следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{\psi_{w1}} \left(\psi_{w2} + \frac{(n_0 - \theta_0)(H + z_{wa})}{I_w t - H + H_0} \right), \quad (14)$$

где

$$\psi_{w1} = \frac{m_v - m_0}{k_e m_v} + \frac{n_v m_0}{k_s m_v (1 - m_s)},$$

$$\psi_{w2} = 1 - I_k \frac{k_0 n_v m_0}{n_0 m_v} \left(\frac{m_v}{k_s (1 - m_s)} + \frac{1}{k_c} \right),$$

k_e – коэффициент фильтрации скелета грунта (все суффозионные частицы вымыты). Подстановка выражения (14) в уравнение (1) дает

$$\frac{dH}{dt} = \frac{c_1 t + c_2 H + c_3}{I_w t - H + H_0}. \quad (15)$$

Здесь

$$c_1 = I_w \left(I_w - \frac{\psi_{w2}}{\psi_{w1}} \right), \quad c_2 = -I_w - \frac{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}}{\psi_{w1}},$$

$$c_3 = I_w H_0 - \frac{(n_0 - \theta_0) z_{wa} + \psi_{w2} H_0}{\psi_{w1}}.$$

Далее выполняется замена переменных:

$$\hat{H} = H + z_{wa}, \quad \hat{t} = t + \frac{H_0 + z_{wa}}{I_w}, \quad (16)$$

благодаря чему уравнение (15) трансформируется к виду

$$\frac{d\hat{H}}{d\hat{t}} = \frac{c_1 \hat{t} + c_2 \hat{H}}{I_w \hat{t} - \hat{H}}. \quad (17)$$

При этом начальное условие станет

$$\hat{t} = \frac{H_0 + z_{wa}}{I_w}, \quad \hat{H} = z_{wa}. \quad (18)$$

Ход решения аналогичной (17), (18) задачи подробно изложен в [12]. Поэтому ниже он опускается и приводится лишь окончательная зависимость в безразмерной форме между относительными переменными $\bar{H} = H/Z_0$ и $\bar{t} = k_0 t/Z_0$, а именно,

$$\left[\frac{\bar{I}_w (\bar{H} + \bar{z}_{wa}) - \delta_2 (\bar{I}_w \bar{t} + 1 + \bar{z}_{wa})}{\bar{I}_w - \delta_2} \right]^{\frac{1}{2} - \frac{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}}{2\bar{\psi}_{w1} \sqrt{\Delta_\varepsilon}}} \times$$

$$\times \left[\frac{\bar{I}_w (\bar{H} + \bar{z}_{wa}) - \delta_1 (\bar{I}_w \bar{t} + 1 + \bar{z}_{wa})}{\bar{I}_w - \delta_1} \right]^{\frac{1}{2} + \frac{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}}{2\bar{\psi}_{w1} \sqrt{\Delta_\varepsilon}}} =$$

$$= 1 + \bar{z}_{wa}. \quad (19)$$

Здесь в качестве линейного масштаба принята глубина H_0 ; $\bar{I}_w = I_w/k_0$;

$$\delta_{1,2} = \bar{I}_w + \frac{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}}{2\bar{\psi}_{w1}} \pm \frac{\sqrt{\Delta_\varepsilon}}{2};$$

$$\bar{\psi}_{w1} = \frac{\bar{m}_v - 1}{\bar{k}_e \bar{m}_v} + \frac{1 - \bar{m}_0 \bar{m}_v}{\bar{k}_s \bar{m}_v}; \quad (20)$$

$$\psi_{w2} = 1 - I_k \frac{1 - \bar{m}_0 \bar{m}_v}{1 - \bar{m}_0} \left(\frac{\bar{m}_0}{\bar{k}_s} + \frac{1}{\bar{k}_c \bar{m}_v} \right);$$

$$\bar{k}_e = \frac{k_e}{k_0}, \quad \bar{k}_{s,c} = \frac{k_{s,c}}{k_0};$$

$$\Delta_\varepsilon = 4 \frac{n_0 - \theta_0}{\bar{\psi}_{w1}} \bar{I}_w + \left(\frac{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}}{\bar{\psi}_{w1}} \right)^2;$$

I_k – критический градиент; относительные коэффициенты \bar{k}_e , \bar{k}_s , \bar{k}_c предлагается определять в

соответствии с рекомендациями из работ [22, 23], а именно, \bar{k}_e – по формуле

$$\bar{k}_e = \frac{\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0 - \tilde{m}_0\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0^3\bar{D}^2}{(\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0)(1 - \tilde{m}_0)^3},$$

а \bar{k}_s , \bar{k}_c – по формулам

$$\bar{k}_s = \frac{(1 - \tilde{m}_0\tilde{m}_v)^3(\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0 - \tilde{m}_0\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0^3\bar{D}^2)}{(1 - \tilde{m}_0)^3(\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0 - \tilde{m}_0\tilde{m}_0\tilde{m}_v)}, \quad (21)$$

$$\bar{k}_c = \frac{(1 - \tilde{m}_0\tilde{m}_v)^3(\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0 - \tilde{m}_0\tilde{m}_0 + \tilde{m}_0^3\bar{D}^2)}{(1 - \tilde{m}_0)^3\tilde{m}_0^3\bar{D}^2\tilde{m}_v^2}. \quad (22)$$

Здесь $\tilde{m}_0 = m_0/(1 - m_s)$; $\tilde{m}_0 = m_0/m_s$; $\bar{D} = D/d$, D, d – эквивалентные диаметры частиц скелета и суффозионных частиц.

Внутренняя суффозия не только повлечет за собой ускоренный подъем уровня H , но и замедлит увлажнение. Действительно, из начальных условий (9) видно, что скорость фронта увлажнения станет меньше. Кроме того, из-за мобилизации и накопления неструктурных частиц возрастут потери напора в области увлажнения, которые составляют

$$\Delta h = Z_w + z_{wa} + H, \quad (23)$$

вследствие нескомпенсированности изменений Z_w и H . Таким образом, относительные потери напора, согласно (10), будут

$$\Delta \bar{h} = \frac{\Delta h}{H_0} = \quad (24)$$

$$= \frac{1}{n_0 - \theta_0} [(n_0 - \theta_0 - 1)\bar{H} - 1 + z_{wa}(n_0 - \theta_0)].$$

Всесторонне проанализировать роль внутренней суффозии в процессе увлажнения позволяют четыре формулы для расчета $H(t)$ в сходных фильтрационных и деформационных условиях. Так как все они не учитывают воздействия подвижных частиц на жидкую фазу, то вытекают из единой обобщенной формулы [12]. Первая (контрольная) относится к однородному недеформированному грунту. Вторая, вспомогательная формула, также предназначена для однородного грунта, но после удаления из него всех неструктурных частиц. Третья и четвертая формулы, в отличие от первых, уже отражают изменения физико-механических свойств грунта в связи с протекающей внутренней суффозией и образованием двух характерных зон с разными проницаемостями, но только в предельном смысле. Детально соответствующие гипотетические ситуации характеризуются применительно ко второй стадии инфильтрационного процесса.

Вторая стадия (рис. 1, б). Задача инфильтрации жидкости в суффозионный грунт на второй стадии также может быть сведена к простой задаче Коши (9), (15). При этом ее форма и решение значительно упрощаются благодаря тому, что $I_w = 0$. В частности, понижение относительного уровня на поверхности грунта \bar{H} со временем описывается обратной функцией

$$\begin{aligned} \bar{t} = \bar{t}_1 + \frac{\bar{\psi}_{w1}}{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}} \times \quad (25) \\ \times \left(1 - \bar{H} + \frac{(n_0 - \theta_0)(z_{wa} + 1)}{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}} \times \right. \\ \left. \times \ln \frac{(n_0 - \theta_0 - \psi_{w2})\bar{H} + (n_0 - \theta_0)z_{wa} + \psi_{w2}}{(n_0 - \theta_0)(z_{wa} + 1)} \right), \end{aligned}$$

где $\bar{t} = k_0t/H_0$, $\bar{H} = H/H_0$, $\bar{z}_{wa} = z_{wa}/H_0$, H_0 – глубина поверхностного слоя воды уже в конце первой и начале второй стадий ($t = t_1$); коэффициенты $\bar{\psi}_1$, ψ_2 вычисляются согласно (20). Из (25) следует, что вторая стадия завершится в момент полной сработки поверхностного слоя:

$$\begin{aligned} \bar{t}_2 = \bar{t}_1 + \frac{\bar{\psi}_{w1}}{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}} \times \\ \times \left(1 + \frac{(n_0 - \theta_0)(z_{wa} + 1)}{n_0 - \theta_0 - \psi_{w2}} \ln \frac{(n_0 - \theta_0)z_{wa} + \psi_{w2}}{(n_0 - \theta_0)(z_{wa} + 1)} \right). \end{aligned}$$

Общие относительные потери напора в области движения составят

$$\Delta \bar{h} = \frac{\Delta h}{H_0} = \frac{1}{n_0 - \theta_0} \times \quad (26)$$

$$\times [(n_0 - \theta_0 - 1)\bar{H} + 1 + z_{wa}(n_0 - \theta_0)].$$

Полное представление о значимости изменений физико-механических свойств грунта вследствие инфильтрации и внутренней суффозии позволяет получить сопоставление значений \bar{H} , $\Delta \bar{h}$, рассчитанных по формулам (25), (26) и по формулам, отвечающим специальным фильтрационным условиям, а именно: недеформированный грунт, полная ассоциация жидкости и неструктурных частиц, мгновенная остановка движущегося вещества. Контрольные значения указанных характеристик (исходный грунт) следует определять по следующей формуле [24]:

$$\bar{t} = \frac{1}{1 - n_0 + \theta_0} \left[1 - \bar{H} - (1 - \psi_w) \ln \frac{1 - \psi_w}{\bar{H} - \psi_w} \right], \quad (27)$$

где $\psi_w = (1 + n_0\bar{z}_{wa} - \theta_0z_{wa})/(1 - n_0 + \theta_0)$, и по выражению (26).

Вместе с тем заслуживает внимания изменение фильтрационного режима в двух крайних ситуациях, отвечающих двум предельным механическим состояниям суффозионного вещества – максимальная подвижность и покой. Базовой расчетной формулой для них также является (25), в которой, однако, видоизменяются коэффициенты $\bar{\psi}_{w1}$, ψ_{w2} . В первой ситуации влияние вещества вследствие его ассоциированности с жидкостью проявляется только через сокращение объема жидкости (весьма значительное в аккумулирующей зоне). Тогда вид коэффициента $\bar{\psi}_{w1}$ не меняется, а

$$\psi_{w2} = 1. \quad (28)$$

Но особенно показательной представляется предельная для динамических условий и реальная после остановки суффозионного процесса ситуация, наступающая в результате мгновенной иммобилизации всех подвижных частиц. Таким образом, на практике часто образуется прослойка, проницаемость которой может оказаться существенно хуже, чем у исходного грунта. Естественно, что для такого случая в расчетах на основе (25) и при коэффициентах ψ_{w2} , согласно (28) и

$$\bar{\psi}_{w1} = \frac{\bar{m}_v - 1}{k_e \bar{m}_v} + \frac{1}{\bar{m}_v} \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c} \right), \quad (29)$$

снижение обеих границ комбинированного (содержащего твердые частицы только на нижнем участке) водного потока замедляется. Отличие же скоростей границ при вынужденном движении суффозионных частиц и их условной фиксации наглядно демонстрирует серьезность возможных изменений фильтрационных свойств грунта в связи с инфильтрацией.

Третья стадия (рис. 1, в, з). На третьей стадии вся впитавшаяся в грунт вода переходит в связанное состояние, если инфильтрационный процесс по изложенным выше причинам не прервется раньше. Его формальное описание здесь, как и расчеты фильтрационных характеристик, существенно осложняются ввиду прогрессирующего перераспределения по грунтовому профилю неструктурных частиц и поэтому должны выполняться в два этапа. В начале первого и всей третьей стадии на поверхности грунта возникает и затем перемещается вниз, сближаясь с аккумулирующей зоной, фронт осушения ($z = -Z_e$). При этом выше него образуется и увеличивается зона осушения ($0 \geq z \geq -Z_e$) с повышенной влажностью θ_e . Фактически каждому грунту отвечает присущее ему значение θ_e , которое в случае сельскохозяйственных земель можно трактовать как верхний

предел диапазона оптимальных для растений влажностей. Математическая модель фильтрации на первом этапе (рис. 1, в) включает уравнения (3), (4), граничные условия (5), (6), которые прежде всего дополняются условием на новообразованном фронте осушения:

$$z = -Z_e, \quad h_e = -Z_e + z_{we}, \quad (30)$$

где z_{we} – корректив для учета капиллярных сил на фронте осушения. Также к модели присоединяются условие равенства потоков на внутренней границе

$$z = -Z_m, \quad k_e \frac{\partial h_e}{\partial z} = n_v u_a, \quad (31)$$

а также два балансовых соотношения. В частности, уравнение баланса жидкости будет следующим:

$$\int_{-Z_w}^{-Z_m} (n_v - \theta_0) dz + \int_{-Z_m}^{-Z_e} (1 - m_s - \theta_0) dz + \int_{-Z_e}^0 (\theta_e - \theta_0) dz = Z^0 (n_0 - \theta_0), \quad (32)$$

где Z^0 – глубина фронта увлажнения к началу третьей стадии, равная $I_w t_1 / (n_0 - \theta_0)$. Поскольку, как правило, $\theta_e > \theta_0$, то поступившая извне вода в первую очередь расходуется на повышение влажности грунта от θ_0 до θ_e и только затем на испарение и транспирацию. Из (32) следует соотношение между Z_w , Z_m , Z_e :

$$n_v (Z_w - Z_m) + n_s (Z_m - Z_e) + \theta_e Z_e = n_0 Z^0 + (Z_w - Z^0) \theta_0. \quad (33)$$

Уравнение же баланса суффозионных частиц в области увлажнения имеет вид

$$\int_{-Z_w}^{-Z_m} m_v dz = m_v (Z_w - Z_m) = m_0 Z_w. \quad (34)$$

В результате интегрирования уравнений (3), (4) с привлечением условий (5), (6) напоры h_e , h_a представляются в виде

$$h_e = -Z_e + z_{we} + \frac{Z_w - Z_e + z_{we} + z_{wa} - n_v \left(\frac{u_a}{k_s} + \frac{u_k}{k_c} \right) (Z_w - Z_m)}{Z_m - Z_e} \times \quad (35)$$

$$h_a = -Z_w - z_{wa} + n_v \left(\frac{u_a}{k_s} + \frac{u_k}{k_c} \right) (z + Z_w). \quad (36)$$

Зависимости (35), (36) содержат неизвестные величины $Z_w(t)$, $Z_m(t)$, $Z_e(t)$, которые могут быть исключены благодаря применению балансовых условий (33), (34) и кинематического условия на фронте увлажнения

$$\frac{dZ_w}{dt} = u_a.$$

Тогда из зависимостей (35), (36) вытекает

$$Z_m = \left(1 - \frac{m_0}{m_v} \right) Z_w, \quad (37)$$

$$Z_e = \frac{1}{1 - m_s - \theta_e} \left\{ \left[(n_v - \theta_0) \frac{m_0}{m_v} + (1 - m_s - \theta_0) \left(1 - \frac{m_0}{m_v} \right) \right] Z_w - (n_0 - \theta_0) Z^0 \right\}. \quad (38)$$

На третьей стадии в качестве единого масштаба длины целесообразно выбрать Z^0 . Тогда благодаря введению относительных величин $\bar{Z}_w = Z_w/Z^0$, $\bar{Z}_m = Z_m/Z^0$, $\bar{Z}_e = Z_e/Z^0$, $\bar{z}_{wa} = z_{wa}/Z^0$, $\bar{z}_{we} = z_{we}/Z^0$, $\bar{t} = k_0 t/n_v Z^0$, кинематическое условие трансформируется в уравнение относительно \bar{Z}_w :

$$\frac{d\bar{Z}_w}{d\bar{t}} = \bar{k}_e \frac{\varphi_{11} + \varphi_{12} \bar{Z}_w}{\varphi_{13} + \varphi_{14} \bar{Z}_w}, \quad (39)$$

где

$$\varphi_{11} = \bar{m}_v \left(\bar{z}_{wa} + \bar{z}_{we} + \frac{n_0 - \theta_0}{1 - m_s - \theta_e} \right),$$

$$\varphi_{12} = \bar{m}_v - \frac{n_v - \theta_0}{1 - m_s - \theta_e} - \frac{1 - m_s - \theta_0}{1 - m_s - \theta_e} (\bar{m}_v - 1) - \frac{I_k (1 - \tilde{m}_0 \bar{m}_v)}{\bar{k}_c (1 - \tilde{m}_0)},$$

$$\varphi_{13} = \frac{\bar{m}_v (n_0 - \theta_0)}{1 - m_s - \theta_e},$$

$$\varphi_{14} = \bar{m}_v - 1 + \frac{\bar{k}_e}{k_s} - \frac{n_v - \theta_0}{1 - m_s - \theta_e} - \frac{1 - m_s - \theta_0}{1 - m_s - \theta_e} (\bar{m}_v - 1).$$

Решение (39) при начальном условии

$$\bar{t} = \bar{t}_2, \quad \bar{Z}_w = 1 \quad (40)$$

(t_2 – время окончания второй стадии) дает возможность получить простую формулу для вычисления относительного времени достижения фронтом увлажнения глубины \bar{Z}_w :

$$\bar{t} = \bar{t}_2 + \frac{\varphi_{14}}{\varphi_{12}} (\bar{Z}_w - 1) + \quad (41)$$

$$+ \frac{\varphi_{13} \varphi_{12} - \varphi_{11} \varphi_{14}}{\varphi_{12}^2} \ln \frac{\varphi_{11} + \varphi_{12} \bar{Z}_w}{\varphi_{11} + \varphi_{12}}.$$

Подстановка заданного значения \bar{Z}_w в формулы (37), (38) позволяет вычислить значения \bar{Z}_m , \bar{Z}_e , соответствующие заданному времени согласно (41).

Первый этап завершается в момент времени t_3 достижения фронтом осушения аккумулярующей зоны ($Z_e(t_3) = Z_m(t_3) = Z_*$). Отвечающая этому моменту глубина фронта увлажнения Z_3 находится из уравнений (37), (38):

$$\bar{Z}_3 = \frac{Z_3}{Z^0} = \frac{\bar{m}_v (n_0 - \theta_0)}{n_v - \theta_0 - (\theta_e - \theta_0) (\bar{m}_v - 1)}. \quad (42)$$

Тогда время \bar{t}_3 определяется по формуле (41) при $\bar{Z}_w = \bar{Z}_3$, а \bar{Z}_* – по (37).

В дальнейшем область увлажнения целиком находится в аккумулярующей зоне, занимая ее нижний участок (рис. 1, з). Очевидно, что на втором этапе в математической модели сохраняются уравнение (4), условие (5) и к ним присоединяется условие на верхней границе указанной области

$$z = -Z_e, \quad h_a = -Z_e + z_{we}; \quad (43)$$

баланс жидкости в ней

$$(n_v - \theta_0) (Z_w - Z_3) = (n_v - \theta_e) (Z_e - Z_*). \quad (44)$$

Интегрирование (4) при условии (5) дает (33). С учетом (43) из соотношения (33) находится выражение для скорости u_a :

$$u_a = \frac{k_s}{n_v} \left(1 + \frac{z_{wa} + z_{we}}{Z_w - Z_e} \right) - \frac{k_s}{k_c} u_k. \quad (45)$$

Наконец на основе (34) и (45) составляется уравнение относительно \bar{Z}_w в безразмерной форме:

$$\frac{d\bar{Z}_w}{d\bar{t}} = \bar{k}_s \frac{\varphi_{21} + \varphi_{22} \bar{Z}_w}{\varphi_{23} + \varphi_{24} \bar{Z}_w}, \quad (46)$$

где

$$\varphi_{21} = \left(1 - \frac{I_k}{k_c} \frac{1 - \tilde{m}_0 \bar{m}_v}{1 - \tilde{m}_0} \right) \left(\frac{n_v - \theta_0}{n_v - \theta_e} \bar{Z}_3 - \bar{Z}_* \right) +$$

$$+ \bar{z}_{wa} + \bar{z}_{we},$$

$$\varphi_{22} = \left(1 - \frac{I_k}{k_c} \frac{1 - \tilde{m}_0 \bar{m}_v}{1 - \tilde{m}_0} \right) \frac{\theta_0 - \theta_e}{n_v - \theta_e},$$

$$\varphi_{23} = \frac{n_v - \theta_0}{n_v - \theta_e} \bar{Z}_3 - \bar{Z}_*, \quad \varphi_{24} = \frac{\theta_0 - \theta_e}{n_v - \theta_e}.$$

Решение уравнения (46) построено при условии

$$\bar{t} = \bar{t}_3, \quad \bar{Z}_w = \bar{Z}_3$$

и имеет вид

$$\bar{t} = \bar{t}_3 + \frac{1}{k_s \varphi_{22}} \left[\varphi_{24} (\bar{Z}_w - \bar{Z}_3) + \right. \quad (47)$$

$$\left. + \frac{\varphi_{23} \varphi_{22} - \varphi_{21} \varphi_{24}}{\varphi_{22}} \ln \frac{\varphi_{21} + \varphi_{22} \bar{Z}_w}{\varphi_{21} + \varphi_{22} \bar{Z}_3} \right].$$

К моменту \bar{t}_4 , когда вся инфильтрационная вода станет связанной, конечная относительная глубина фронта увлажнения \bar{Z}_4 составит

$$\bar{Z}_4 = \frac{Z_4}{Z^0} = \frac{(n_v - \theta_0) \bar{Z}_3 - (n_v - \theta_e) \bar{Z}_*}{\theta_e - \theta_0}.$$

Относительное же время завершения инфильтрационного процесса \bar{t}_4 вычисляется из уравнения (47) при $\bar{Z}_w = \bar{Z}_4$. С момента времени t_3 аккумуляция неструктурного вещества становится невозможной и новые мобилизованные частицы проходят транзитом через область увлажнения. Оказавшись на ее верхней границе ($z = -Z_e$), они осаждаются. Таким образом, начиная с глубины Z_* , формируется слой с иммобилизованными суффозионными частицами (рис. 1, з). Их концентрация m_c определяется исходной m_0 и скоростью сближения границ указанной области, а фактически – разницей между θ_e и θ_0 . В частности, при $\theta_0 = \theta_e$ будет $m_c = m_0$. Если же $\theta_e > \theta_0$, то m_c будет иметь промежуточное значение между m_0 и m_v . Для установления этой величины составляется уравнение баланса суффозионных частиц в следующей форме:

$$[Z_w(t) - Z_e(t)] m_v + [Z_w(t + \Delta t) - Z_w(t)] m_0 =$$

$$= [Z_w(t + \Delta t) - Z_e(t + \Delta t)] m_v +$$

$$+ m_c [Z_e(t + \Delta t) - Z_e(t)].$$

Отсюда, переходя к безразмерным величинам, получаем

$$\bar{m}_c = \frac{m_c}{m_0} = \bar{m}_v - (\bar{m}_v - 1) \frac{d\bar{Z}_w}{d\bar{Z}_e}. \quad (48)$$

Чтобы найти производную $d\bar{Z}_w/d\bar{Z}_e$, выражение (38) дифференцируется по \bar{Z}_w . В итоге искомая \bar{m}_c будет

$$\bar{m}_c = \bar{m}_v \frac{n_0 - \theta_0 + (\theta_e - \theta_0) (\bar{m}_v - 1)}{n_v - \theta_0 + (1 - m_s - \theta_0) (\bar{m}_v - 1)}. \quad (49)$$

Количественный анализ влияния внутренней суффозии на инфильтрационный процесс выполнялся на примере второй стадии в силу определенности гидрологических условий в ее начале и конце, причем независимо от первой. При этом для

его упрощения полагалось $Z_w(t_1) = \theta_0 = 0$. Предметом расчетов стала динамика относительных высоты поверхностного слоя воды и потерь напора в области увлажнения. Базовыми расчетными формулами были (25), (26), а также (20). Для оценки значимости деформационного эффекта привлекалась контрольная формула (27), отвечающая недеформированному грунту. Наконец, на ряде конкретных случаев исследовались отклонения важнейших водно-физических характеристик (\bar{H} , $\Delta \bar{h}$) при наступлении предельных механических состояний у суффозионной компоненты грунта (покой или синхронное с жидкостью движение). Был выполнен весьма большой объем вычислений при следующей типичной исходной информации: $m_s = 0.6$, $m_0 = 0.04$ ($n_0 = 0.36$, $\bar{m}_0 = 0.1$, $\bar{m}_0 = 0.0667$), $I_k = 0.1$, $\bar{D} = 5$. Максимальная степень насыщения грунта неструктурными частицами, характеризуемая параметром \bar{m}_v , дискретно менялась от 2 до 6. В первой серии расчетов принималось $\bar{m}_v = 5$ и определялись как фактические значения \bar{H} , $\Delta \bar{h}$ (при коэффициентах $\bar{\psi}_{w1}$, $\bar{\psi}_{w2}$ согласно (20)), так и эталонные, а также предельные с точки зрения поведения отмеченных частиц (при $\bar{\psi}_{w1}$, $\bar{\psi}_{w2}$ в соответствии с (28) и (29)). На рис. 2 демонстрируется снижение уровня \bar{H} вплоть до момента $\bar{t} = 1$. Кривые $\bar{H}(\bar{t})$ прежде всего свидетельствуют о реальности серьезных изменений фильтрационных свойств грунта, что может повлечь за собой столь же значительное снижение в нем интенсивности последующих фильтрационных процессов. Следует особо отметить близость кривых 2–4, которые почти сливаются. Это означает, что влияние аккумуляции суффозионных частиц, препятствующей течению воды, и влияние их подвижности, облегчающей его, практически взаимно компенсируются. Вследствие же малости градиента I_k , скорости жидкости и частиц различаются незначительно и поэтому их синхронизация почти не сказывается на снижении уровня \bar{H} . Наоборот, условная фиксация в действительности подвижных частиц в расчетный момент времени, что имитирует резкое прекращение инфильтрационного процесса, ведет к значимому ухудшению фильтрационной способности грунта и, как следствие, соответствующему ослаблению вертикального водообмена (кривая 1). Сходным образом, как видно из рис. 3, реагируют на гипотетические изменения условий фильтрации в рассматриваемых четырех ситуациях общие потери напора. Намного ниже других расположена кривая 4, отражающая резкое замедление роста гидравлических потерь вследствие низкой проницаемости, по существу, слабопроницаемого

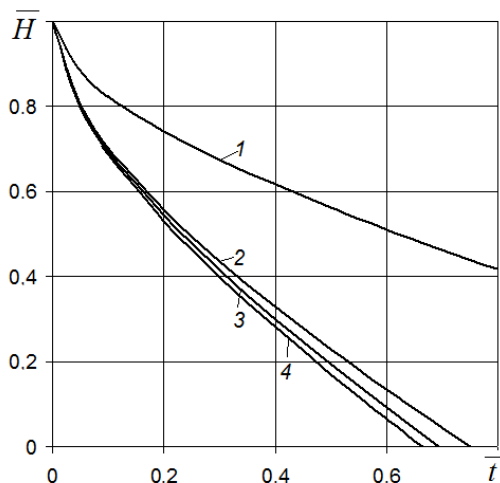


Рис. 2. Снижение относительного уровня воды на поверхности грунта во времени: 1–3 – деформ. грунт, 4 – контроль; 1 – по форм. (29); 2 – по форм.(20); 3 – по форм.(28)

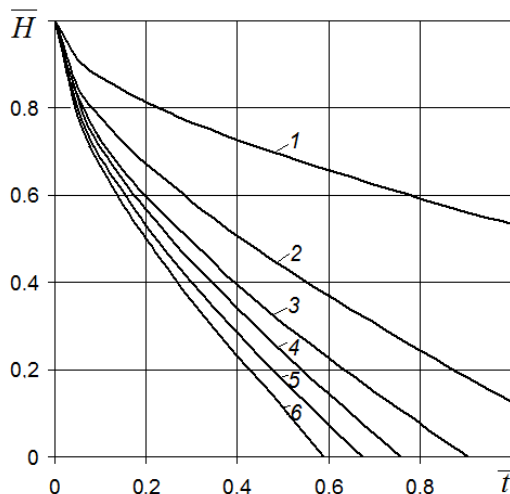


Рис. 4. Снижение относительного уровня воды на поверхности грунта во времени: 1, 2, 4 – по форм.(29); 3, 5, 6 – по форм.(20); 1, 3 – $\bar{m}_v = 6$; 2, 5 – $\bar{m}_v = 4$; 4, 6 – $\bar{m}_v = 2$

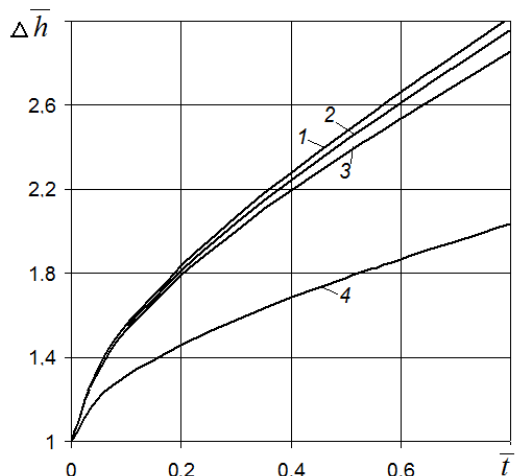


Рис. 3. Рост относительных потерь напора в увлажняемом грунте во времени: 1 – контроль; 2–4 – деформ. грунт; 2 – по форм. (28); 3 – по форм. (20); 4 – по форм. (29)

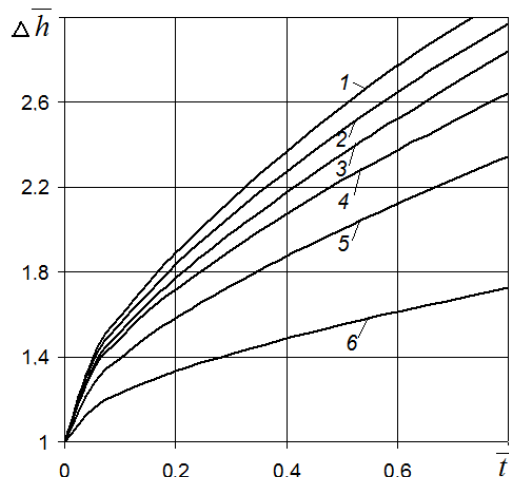


Рис. 5. Рост относительных потерь напора в увлажняемом грунте во времени: 1, 2, 4 – по форм. (20); 3, 5, 6 – по форм. (28); 1, 3 – $\bar{m}_v = 2$; 2, 5 – $\bar{m}_v = 4$; 4, 6 – $\bar{m}_v = 6$

слоя (аккумуляционной зоны). В остальных случаях изменения напора происходят практически одинаково.

Важную роль в трансформации инфильтрационного режима под влиянием внутренней суффозии играет емкостный параметр \bar{m}_v . На рис. 4 и 5 показаны кривые зависимостей $\bar{H}(\bar{t})$ и $\Delta \bar{h}(\bar{t})$, построенные для разных его значений при естественном инфильтрационном процессе и затрудненном фиксацией положения суффозионных частиц. Очевидно, что в связи с увеличением \bar{m}_v

темпы отвода поверхностных вод посредством инфильтрации и нарастания гидравлических потерь ощутимо снижаются, а длительность стадии соразмерно возрастает. Таким образом, в экспериментальных исследованиях внутренней суффозии большое внимание следует уделять изучению аккумуляционной способности суффозионного грунта по отношению к неструктурным частицам и установлению параметра \bar{m}_v .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивный приток к поверхности земли жидкости способствует активному протеканию увлажнительного процесса, который нередко сопровождается формированием ее поверхностного слоя с растущей глубиной (первая стадия). Со временем указанный слой срабатывается (вторая стадия) и наступает третья стадия промачивания грунта, для которой характерно стекание накопившейся в верхней части почвогрунта гравитационной влаги вниз по профилю и постепенное ее расходование на пополнение запасов доступной растениям влаги. Указанный процесс на практике продолжается или до полного перехода всей свободной жидкости в связанное состояние, или до момента смыкания фронта увлажнения с грунтовыми водами. Достаточно надежно фильтрационный процесс в недеформируемых грунтах на всех трех стадиях их увлажнения описывается моделью Грина-Ампта. Однако в суффозионных грунтах математическая модель значительно усложняется, если одновременно с течением жидкости развивается механическая суффозия. При превышении же скоростью инфильтрации определенного порогового значения в аккумулярующей зоне, где сосредоточены все мобильные суффозионные частицы, их концентрация достигает максимальной величины, которая зависит от физико-механических свойств грунта. Скопившиеся в аккумулярующей зоне мелкие частицы являются дополнительным препятствием для фильтрационного течения и замедляют просачивание инфильтрационной жидкости в грунт. В то же время, вследствие их подвижности влияние суффозионного процесса на увлажнительный в целом оказывается малозначительным. При резкой остановке суффозионных частиц, вследствие прекращения инфильтрационного процесса второй фактор (мобильность) отпадает и, как следствие, образовавшийся на месте аккумулярующей зоны слабопроницаемый слой способен в значительной степени ухудшить гидравлическую связь между выше- и нижележащими слоями водоносного пласта. Важное значение для обоих процессов имеет предельная емкость грунта по отношению к суффозионным частицам. А поскольку механическое состояние грунта при полном его насыщении указанными частицами до сих пор фактически не изучалось, то в будущих экспериментальных исследованиях внутренней суффозии целесообразно уделить определению вышеупомянутого параметра особое внимание.

В. Л. Поляков

1. Абрамов С.К., Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С. и др. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами при строительстве.– М.: Стройиздат, 1978.– 176 с.
2. Яковенко Ю.П. Математичне моделювання і дослідження роботи інфільтраційних басейнів // Меліорація і водне господарство.– 2009.– Вип.97.– С. 166–179.
3. Дунин Ф.Х. Моделирование инфильтрации в приближении к полевым условиям // В кн.: Грани гидрологии.– Л.: Гидрометеиздат.– 1980.– С. 241–275.
4. Корбутяк М.В., Зюзанский Н.Б. Исследование формирования и расчет ливневого стока с орошаемых земель // Мелиорация и водное хозяйство.– 1984.– Вип. 61.– С. 33–37.
5. Харченко С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в Нечерноземной зоне.– Л.: Гидрометеиздат, 1987.– 240 с.
6. Веригин Н.Н., Васильев С.В. Промачивание почв и грунтов зоны аэрации // Прикл. техн. физ.– 1977.– N 1.– С. 133–137.
7. Гусев Е.М. Экспериментальные исследования напорного впитывания.– В кн.: Физика почвенных вод.– Москва: Наука, 1981.– 195–205 с.
8. Guyonnet D., Amraoui N., Kara R. Analysis of transient data from infiltrometer tests in fine-grained soils // Ground Water.– 2000.– 38, № 3.– P. 396–402.
9. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики.– М.: Недра, 1974.– 296 с.
10. Поляков В.Л. Оценка влияния внутренней суффозии на эффективность увлажнения несвязных грунтов // Вісник НУВГП.– Рівне: НУВГП.– 2007.– Вип.4(40), ч. 2.– С. 544–553.
11. Хлапук М.М., Дмитрієв Д.А. Розподіл градієнтів напору в придірній зоні осушувально-зволожувальних систем // Вісник РДТУ.– Рівне.– 2001.– Вип. 4(11).– С. 105–110.
12. Поляков В.Л. Интенсивное промачивание многослойных грунтов // Прикладна гідромеханіка.– 2008.– 10(82), № 1.– С. 69–79.
13. Davidson M.R. A Green-Ampt model of infiltration in a cracked soil // Water Resour. Res.– 1984.– 20.– P. 1685–1690.
14. Geiger S.L., Durnford D.S. Infiltration in homogeneous sands and a mechanistic model of unstable flow // Soil Sci. Soc. Am. J.– 2000.– 64.– P. 460–469.
15. Green W.H., Ampt G.A. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils // J. Agr. Sci.– 1911.– 4(1).– P. 1–24.
16. Grismer M.E., Orang M.N., Clausnitzer V., Kinney K. Effects of air compression and counterflow of infiltration into soils // J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE.– 1994.– 120, № 4.– P. 775–795.
17. Parlange J.-Y., Haverkamp R., Touma J. Infiltration under ponded conditions: 1. Optimal analytic solution and comparison with experimental observations // Soil Sci.– 1985.– 139.– P. 305–311.
18. Watson K., Awadalla S.A. Comparative study of the Green and Ampt analysis for a falling water table in a stratified profile // Water Resour. Res.– 1986.– 22.– P. 723–730.
19. Поляков В.Л. Промачивание суффозионных грунтов. 1. Суффозия // Прикладна гідромеханіка.– 2003.– 5(77).– С. 72–82.

77

20. Поляков В.Л. Внутренняя суффозия при интенсивном увлажнении несвязных грунтов (первая и вторая стадии насыщения) // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідраліки. – К.: КНУБА.– 2008.– Вип. 10.– С. 107–118.
21. Веригин Н.Н., Васильев С.В., Куранов Н.П. и др. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод.– М.: Колос, 1979.– 336 с.
22. Поляков В.Л. Коэффициент фильтрации несвязных грунтов при фильтрационных деформациях // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідраліки. – К.: КНУБА.– 2012.– Вип. 20.– С. 96–104.
23. Поляков В.Л. К расчету коэффициента фильтрации суффозионных грунтов // Доп.НАН України.– 2012.– N 8.– С. 54–59.
24. Усенко В.С. Искусственное восполнение запасов и инфильтрационные водозаборы подземных вод.– Минск: Наука и техника, 1972.– 256 с.