

**В. Л. Поляков**

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

*E-mail:* polyakov\_igm@list.ru

## **О моделировании регулируемого водного режима в колонке грунта**

*(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А. Я. Олейником)*

*Получены аналитические решения задач осушения и увлажнения колонки грунта с углубленным учетом влияния зоны аэрации на фильтрационный процесс. Рассчитаны фильтрационные характеристики для трех классов мелкодисперсных грунтов. Показано, что упрощенное описание межзонного водообмена может приводить к значительным погрешностям в фильтрационных расчетах регулируемого водного режима.*

**Ключевые слова:** грунт, фильтрация, влагоперенос, водообмен, водоотдача, водонасыщение, уровеньный режим.

При научном обосновании алгоритма управления водным режимом безнапорных водоносных пластов, как правило, внимание акцентируется на положении и динамике уровня грунтовых вод (УГВ) [1–3]. Особое отношение к уровенному режиму осушаемых или увлажняемых грунтов в первую очередь объясняется тем, что его удастся достоверно прогнозировать, основываясь на сравнительно простых фильтрационных моделях. Слабым местом у таких моделей часто является одна из важнейших статей баланса грунтовых вод, а именно, их обмен с почвенными водами в зоне аэрации. Следует подчеркнуть, что теоретический анализ подобного водообмена, а, по сути, влияния гравитационных, капиллярных и сорбционных сил на фильтрационный процесс выполнять сложно ввиду существенной нелинейности математических моделей влагопереноса. И естественно, что действенным инструментом для их исследований являются численные, а не аналитические методы. Благодаря их применению при наличии необходимого информационного обеспечения удастся прежде всего рассчитывать с высокой точностью влажность среды и поток влаги в пределах ненасыщенной зоны. При моделировании действия дренажных устройств ключевое значение приобретает указанный поток на ее нижней границе. Кроме того, данные численных расчетов влажностных характеристик позволяют формализовать соответствие между интенсивностью межзонного водообмена и УГВ. Известно, что режимы влажности и УГВ хотя и неоднозначно, но все-таки тесно взаимосвязаны [4]. Фактически однозначная связь между ними при осушении устанавливается только после стекания из зоны аэрации всей гравитационной влаги. Кстати, вопросы физического и биологического испарения влаги в данной работе не затрагиваются. Тогда конечный

(стационарный) профиль влажности будет тождественен кривой водоудерживания. Отклонение же промежуточных профилей от стандартного обусловлено запаздывающим характером движения влаги. Ее задержка зависит главным образом от интенсивности водно-физических процессов, мерой которой может служить скорость перемещения УГВ  $V_H$ . В работе [5] предложено конструировать аппроксимационные выражения для интенсивности межзонного водообмена  $W$ , учитывая ее преимущественную зависимость от отметки УГВ  $H$  и скорости  $V_H$ . [6, 7], следующим образом

$$W\left(H, \frac{dH}{dt}\right) = \mu_{d,w}\left(H, \frac{dH}{dt}\right) \cdot \frac{dH}{dt}, \quad (1)$$

где функции водоотдачи ( $\mu_d$ ) и водонасыщения ( $\mu_w$ ) в соответствии с мультипликативным принципом принимаются в таком виде:

$$\mu_{d,w}\left(H, \frac{dH}{dt}\right) = \mu_{dm,wm}(H) \left(1 + a_{d,w} \sqrt{\mp \frac{dH}{dt}}\right)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь знак “ $-$ ” под корнем и коэффициент  $a_d$  отвечают осушению грунта, а знак “ $+$ ” там же и  $a_w$  – увлажнению. Определяющее значение в (2) имеют, по существу, предельные функции  $\mu_{dm,wm}(H)$ , которые характеризуют максимальные при данном положении УГВ водоотдачу и водонасыщение грунта. Согласно (2), они достигаются при бесконечно медленном перемещении УГВ, так что вся гравитационная влага при осушении успевает из зоны аэрации стечь на свободную поверхность, а при увлажнении перейти там же в капиллярно или сорбционно связанное состояние. Тогда в указанной зоне имеет место равновесное распределение влажности, которое, кстати, существенно зависит от направленности водно-физических процессов. Таким образом, для определения вышеупомянутых функций достаточно предварительно задаться основной гидрофизической характеристикой (ОГХ), которая устанавливает однозначную связь между влажностью  $\theta$  и (всасывающим) давлением  $\psi$  в равновесных условиях. Наибольшим авторитетом у почвоведов, мелиораторов пользуется эмпирическая четырехпараметрическая формула Генухтена [8]

$$\theta_d = \theta_s - \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \alpha^n \psi^n}, \quad (3)$$

где  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  – полная за вычетом заземленного воздуха и остаточная влагоемкости. Именно на ее основе создан полный банк данных по эмпирическим коэффициентам  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  и дополнительно коэффициенту фильтрации  $k$ . Все изученные мелкодисперсные грунты в зависимости от относительного содержания в них трех основополагающих фракций (глина, ил, песок) разделены на двенадцать классов и каждому из них приписан набор репрезентативных значений указанных коэффициентов [9–11]. Тогда для любого класса грунта в соответствии (3) рекомендуется для предельной функции водоотдачи принимать

$$\mu_{dm}(H) = (\theta_s - \theta_r) \left\{ 1 - [1 + \alpha^n (M - H)^n]^{\frac{1-n}{n}} \right\}, \quad (4)$$

где  $M$  – отметка поверхности земли. В условиях увлажнения грунта равновесная влажность  $\theta_w$  заметно отличается от  $\theta_d$ . Используя соотношение между ними [12, 13]

$$\theta_w(\psi) = \theta_s \left( \sqrt{\frac{\theta_d(\psi)}{\theta_s}} \right),$$

для предельной функции водонасыщения получено следующее выражение

$$\mu_{wm}(H) = \sqrt{\theta_s^2 - \theta_r \theta_s} \cdot \sqrt{1 - [1 + \alpha^n (M - H)^n]^{\frac{1-n}{n}}}. \quad (5)$$

Динамичность водно-физических процессов в выражениях для функции  $\mu_{d,w}(H, dH/dt)$  нашла отражение в множителях, содержащих производные  $dH/dt$ . Характерные значения входящих в них коэффициентов  $a_{d,w}$  найдены путем сопоставления результатов численных и аналитических расчетов для всех двенадцати классов. Кроме того, указанные коэффициенты дифференцированы в зависимости от скорости движения свободной поверхности.

Базовые для теоретического анализа уровня режима одномерные уравнения представляют развернутую форму условия сопряжения потоков на межзонной границе [14]. Исходя из равенства здесь скоростей фильтрации и влагопереноса, в случае осушения грунта за счет постоянного пониженного напора в основании колонки грунта  $H_d$  получено уравнение относительно  $H$  в таком виде

$$\mu_{dm}(H) \frac{dH}{dt} - k \frac{H - H_d}{H} \left( 1 + a_d \sqrt{-\frac{dH}{dt}} \right) = 0. \quad (6)$$

Увлажнение же колонки грунта благодаря созданию на ее дне постоянного повышенного напора  $H_w$  можно описать уравнением

$$\mu_{wm}(H) \frac{dH}{dt} - k \frac{H_w - H}{H} \left( 1 + a_w \sqrt{\frac{dH}{dt}} \right) = 0. \quad (7)$$

К уравнениям (6), (7) присоединяется единое начальное условие

$$t = 0, \quad H = m_0, \quad (8)$$

где возможные значения  $m_0$  находятся в пределах между отметками водоупора и поверхностью земли. Другие встречающиеся на практике ситуации, когда образуется поверхностный слой воды или влажность грунта всюду меньше  $\theta_s$ , не рассматриваются.

Прежде всего разрешается уравнение (6) относительно  $V_H$ , так что

$$4H^2 \mu_{dm}^2(H) V_H = (H - H_d)^2 \left( ka_d + \sqrt{k^2 a_d^2 + \frac{4kH \mu_{dm}(H)}{H - H_0}} \right)^2. \quad (9)$$

Отсюда с учетом (8) следует искомое решение в виде такой обратной функции

$$t = 4 \int_H^{m_0} \frac{\zeta^2 \mu_{dm}^2(\zeta) d\zeta}{(\zeta - H_d)^2 \left( k a_d + \sqrt{k^2 a_d^2 + \frac{4k\zeta \mu_{dm}(\zeta)}{\zeta - H_d}} \right)^2}. \quad (10)$$

Вид зависимости (10) несколько упрощается, если ввести безразмерные переменные и параметры:  $\bar{t} = kt/M$ ,  $\bar{H} = H/M$ ,  $\bar{H}_d = H_d/M$ ,  $\bar{m}_0 = m_0/M$ ,  $\bar{a}_d = \sqrt{k} a_d$ . Тогда окончательно формула (10) будет

$$\bar{t} = 4 \int_{\bar{H}}^{\bar{m}_0} \frac{\zeta^2 \mu_{dm}^2(\zeta) d\zeta}{\left[ \bar{a}_d (\zeta - \bar{H}_d) + \sqrt{\bar{a}_d^2 (\zeta - \bar{H}_d)^2 + 4\zeta (\zeta - \bar{H}_d) \mu_m(\zeta)} \right]^2}. \quad (11)$$

Из (11) вытекают два частных случая. Так, при  $H_d=0$

$$\bar{t} = 4 \int_{\bar{H}}^{\bar{m}_0} \frac{\mu_{dm}^2(\zeta) d\zeta}{\left( \bar{a}_d + \sqrt{\bar{a}_d^2 + 4\mu_{dm}(\zeta)} \right)^2}. \quad (12)$$

Если же не принимать во внимание запаздывание влаги ( $a_d=0$ ), то

$$\bar{t} = \int_{\bar{H}}^{\bar{m}_0} \frac{\zeta \mu_{dm}(\zeta)}{\zeta - \bar{H}_d} d\zeta. \quad (13)$$

Относительный фильтрационный расход  $\bar{q}$  в пределах насыщенной зоны будет одинаковым и при известной зависимости  $\bar{H}(\bar{t})$  должен рассчитываться по формуле

$$\bar{q}(\bar{t}) = \frac{q}{k} = 1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}(\bar{t})}. \quad (14)$$

Промежуточных вычислений здесь можно избежать, если в (11) принять

$$\bar{H} = \bar{H}_d / (1 - \bar{q}).$$

Аналогичным образом выведена зависимость, описывающая подъем УГВ в колонке грунта,

$$\bar{t} = 4 \int_{\bar{m}_0}^{\bar{H}} \frac{\zeta^2 \mu_{wm}^2(\zeta) d\zeta}{\left[ \bar{a}_w (\bar{H}_w - \zeta) + \sqrt{\bar{a}_w^2 (\bar{H}_w - \zeta)^2 + 4\zeta (\bar{H}_w - \zeta) \mu_{wm}(\zeta)} \right]^2}. \quad (15)$$

Отсюда при  $a_w=0$

$$\bar{t} = \int_{\bar{m}_0}^{\bar{H}} \frac{\zeta \mu_{wm}(\zeta)}{\bar{H}_w - \zeta} d\zeta. \quad (16)$$

И наконец,

$$\bar{q}(\bar{t}) = \frac{\bar{H}_w}{\bar{H}(\bar{t})} - 1. \quad (17)$$

Опираясь на уравнения (11), (15), легко решать практические задачи понижения или подъема УГВ до заданной отметки  $H_*$  за оптимальное время  $t_*$ . Обеспечивающие необходимый темп перемещения УГВ напоры  $H_{d,w}$  определяются простым подбором из указанных уравнений после соответствующей конкретизации в них значений  $t$  и  $H$ .

Инженерные расчеты фильтрационных характеристик в безнапорных пластах обычно базируются на линеаризованных моделях. При этом нелинейность, связанная с межзонным водообменом, устраняется благодаря замене функций  $\mu_{d,w}(H)$  их осредненными аналогами – коэффициентами водоотдачи  $\mu_{dc}$  и недостатка насыщения  $\mu_{wc}$ . Тогда, пренебрегая задержкой влаги в зоне аэрации, при перемещении УГВ в пределах от отметки  $H$  до поверхности земли указанные коэффициенты будут

$$\mu_{dc,wc} = \frac{1}{M - H} \int_H^M \mu_{d,w}(\zeta) d\zeta.$$

Если грунт в течение расчетного периода насыщен неполностью, так что крайние отметки  $m_0$ ,  $H$  меньше  $M$ , то значения функциональных коэффициентов  $\mu_{dc,wc}$  приходится пересчитывать [5, 15] и, например, при подъеме УГВ с отметки  $m_0$  будет

$$\mu_{wc}(H, m_0) = \frac{(M - m_0) \mu_{wc}(m_0) - (M - H) \mu_{wc}(H)}{H - m_0}.$$

Тогда динамика УГВ просто рассчитывается по известной формуле

$$\bar{t} = \mu_{dc,wc}(\bar{H}, \bar{m}_0) \left( \bar{m}_0 - \bar{H} + H_{d,w} \ln \frac{\bar{m}_0 - \bar{H}_{d,w}}{\bar{H} - \bar{H}_{d,w}} \right). \quad (18)$$

Здесь связь показателей межзонного водообмена с положением УГВ учтена лишь частично, так как при выводе (18) коэффициенты  $\mu_{dc,wc}$  рассматривались как постоянные величины.

Приведенные выше зависимости иллюстрируются расчетами ряда примеров. Для них выбраны грунты с легким механическим составом – чисто песчаный, суглинистый песок, опесчаненный суглинок. Такие грунты имеют высокую проницаемость, а поэтому фильтрационные процессы обычно протекают в них со сравнительно большой скоростью. Предметом расчетов стали относительные величины – отметка УГВ в осушаемой или увлажняемой колонке грунта, а также расход притекающей в зону аэрации влаги. Изначально были зафиксированы такие значения исходных параметров:  $M = 2$ ,  $m_0 = 2$  при осушении и  $m_0 = 0$  при увлажнении,  $H_d = 0$ ,  $H_w = 2$ . Остальные параметры ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $k$ ,  $a_d$ ,  $a_w$ ) варьировались, а их репрезентативные значения для вышеупомянутых грунтовых классов сведены в табл. 1 [1].

Снижение УГВ при нулевом напоре в основании колонки определялось по формулам (11), (13) и (18), а соответствующие расчетные кривые представлены на рис. 1. Кроме

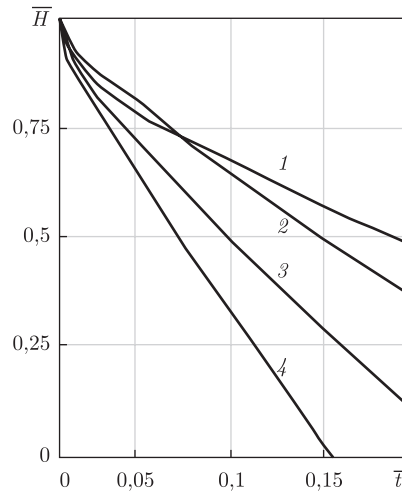


Рис. 1. Снижение УГВ со временем: 1 – грунт III; 2, 4 – грунт I; 3 – грунт II; 1, 3, 4 –  $a_d > 0$ ; 2 –  $a_d = 0$

значений коэффициента  $a_d$  согласно табл. 1, также для него в случае песчаного грунта использовано значение 0 (кривая 2). Сопоставление кривых 2 ( $a_d=0$ ) и 4 ( $a_d>0$ ) показывает, что игнорирование запаздывания стекания влаги на свободную поверхность обуславливает значительную погрешность в расчетах уровня режима. Так, УГВ достигнет дна колонки при  $a_d > 0$  к моменту времени  $\bar{t}_e=0,162$ , если же ( $a_d=0$ ), то  $\bar{t}_e= 0,358$ . Очевидно, что УГВ будет перемещаться медленнее при худшей проницаемости грунта, чем и объясняется взаимное расположение кривых 1, 3, 4. Данные вычислений по (13) и (18) совпали вследствие принятия  $H_d=0$ . Таким образом упрощенная трактовка функций водообмена как функциональных осредненных коэффициентов может также приводить к серьезным ошибкам при вычислении УГВ. Эта ошибка еще более возрастет, если указанные коэффициенты считать постоянными. Расход  $\bar{q}$  в данных условиях не меняется и равен 1.

Результаты расчетов увлажнения грунтов заметно отличаются от описанных выше, что объясняется существенной разницей в предельных ветвях ОГХ (для осушения и увлажнения). Кривые подъема УГВ рассчитывались по формулам (15), (16), (18) и изображены на рис. 2. Чтобы убедиться в важности учета подвижности УГВ в его расчетах здесь, достаточно сравнить кривые 1 ( $a_w>0$ ) и 3 ( $a_w=0$ ). В таком случае погрешность при нахождении УГВ из-за пренебрежения задержкой влаги оказывается порядка 15 %. Специфичность ОГХ у грунтов с легким механическим составом заключается в том, что их влажность резко меняется только при малых значениях всасывающего давления. Как следствие,

Таблица 1. Значения исходных параметров

Класс грунта	$\alpha, \text{м}^{-1}$	$n$	$\theta_s$	$\theta_r$	$k, \text{м/сут}$	$a_d, \text{сут}^{0,5} \cdot \text{м}^{-0,5}$	$a_w, \text{сут}^{0,5} \cdot \text{м}^{-0,5}$
Песок	14,5	2,68	0,43	0,045	7,13	0,1837	0,0904
Суглинистый песок	12,4	2,28	0,41	0,057	3,5	0,3056	0,1457
Опесчаненный суглинок	7,5	1,89	0,41	0,065	1,06	0,5799	0,2688

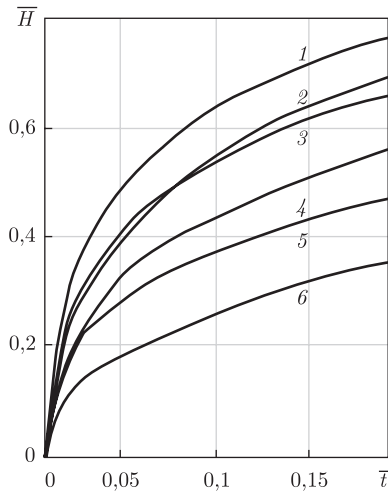


Рис. 2. Подъем УГВ со временем: 1, 3 – грунт I; 2, 4 – грунт II; 5, 6 – грунт III; 1–3, 5 – по (15); 1, 2, 5 –  $a_w > 0$ ; 3 –  $a_w = 0$ ; 3, 4, 6 – по (18)

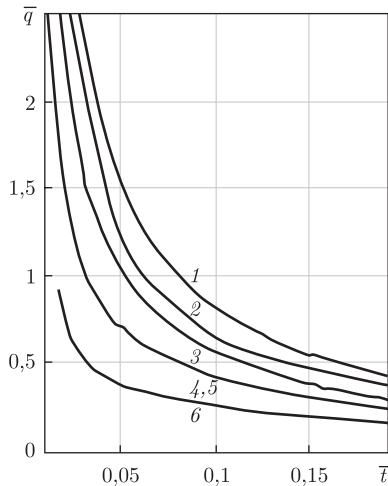


Рис. 3. Относительный фильтрационный расход при увлажнении колонки грунта: 1, 3 – грунт I; 2, 4 – грунт II; 5, 6 – грунт III; 1, 3, 4, 6 – по (15), (17); 1 – при  $a_w = 0$ ; 3, 4, 6 – при  $a_w > 0$ ; 1, 2, 5 – по (17), (18)

даже при значительных колебаниях глубоко залегающего в песке УГВ предельные функции  $\mu_{dm,wm}(H)$  мало чувствительны к его положению. Их же осреднение способно приводить к минимальным ошибкам в расчетах фильтрационных характеристик, но только при условии, что подвижность УГВ слабо сказывается на функциях водообмена. На рис. 2 данные его вычислений для грунта I по (16) и (18) показаны одной линией. Более грубо определяется расход  $\bar{q}$ , если не учитывать запаздывание в развитии зоны аэрации. Его характерные изменения со временем демонстрирует рис. 3. Кривые  $\bar{q}(\bar{t})$  получены при ранее установленных по формуле (17) зависимостях  $\bar{H}(\bar{t})$  и заданном  $\bar{H}_w$ . Ввиду  $m_0 = 0$  в начальный момент времени расход оказался неограниченно большим, но резко снижался



со временем. Тем не менее, ошибки при вычислении  $\bar{q}$  вследствие  $a_w=0$  слабо зависят от  $\bar{t}$  и остаются в течение всего расчетного периода стабильно большими (свыше 30 %).

У грунтов, относящихся к следующим после песка двум по порядку классам и обладающим в несколько раз худшей проницаемостью, форма ОГХ настолько отличается, что осреднение функций водообмена, а затем и использование в практических расчетах осредненных коэффициентов становится неэффективным. В справедливости этого утверждения легко убедиться сравнив эталонные (без осреднения) кривые 2 и 5 на рис. 2; 4 и 6 – на рис. 3 с приближенными (с осреднением) соответственно 4 и 6 на рис. 2, 2 и 5 на рис. 3.

Подводя итоги, следует подчеркнуть, что при интенсивных водно-физических процессах важно аккуратно учитывать не только потенциальную способность грунта аккумулировать гравитационную влагу в зоне аэрации или отдавать ее, но и их динамичность, в частности, скорость перемещения УГВ. Пренебрежение подвижностью УГВ при описании водообмена между насыщенной и ненасыщенной зонами грунта может приводить к серьезным ошибкам в расчетах уровня режима, расходной характеристики и при осушении, и при подпочвенном увлажнении. Такого же порядка погрешности в вычислениях фильтрационных характеристик следует ожидать и при традиционных способах осреднения функций водообмена. В дальнейшем предполагается углубленно учесть влияние зоны аэрации на действие дренажных систем, что потребует аналитического решения уже двухмерных нелинейных задач фильтрации.

## Цитированная литература

1. Маслов Б. С., Станкевич В. С., Черненко В. Я. Осушительно-увлажнительные системы. – Москва: Колос, 1981. – 280 с.
2. Васильев С. В., Веригин Н. Н., Глейзер Б. А. и др. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. – Москва: Колос, 1970. – 440 с.
3. Шкинжис Ц. Н. Гидрологическое действие дренажа. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
4. Мелиорация и водное хозяйство. 3. Осушение: Справочник / Под ред. Б.С. Маслова. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 447 с.
5. Поляков В. Л., Калугин Ю. И. Математическое моделирование водообмена между насыщенной и ненасыщенной зонами дренируемого грунта // Доп. НАН України. – 2016. – № 6. – С. 38–46.
6. Калюжский И. Л., Павлова К. К., Лавров С. А. Гидрофизические исследования при мелиорации переувлажненных земель. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. – 260 с.
7. Моркос Н. З. Экспериментальное изучение динамики водоотдачи // Вест. МГУ. Геология. – 1970. – № 3. – С. 96–101.
8. Van Genuchten M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1980. – 44. – P. 892–898.
9. Сугак В. Т. Динамика электрических характеристик грунтов в зависимости от фильтрационных свойств пород и стратификации зоны аэрации // Радиофизика и электроника. – 2007. – 12, № 1. – С. 185–191.
10. Шеин Е. В., Архангельская Т. А., Гончаров В. М. и др. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / Под ред. Е. В. Шеина. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2001. – 200 с.
11. Mann C. User's guide for the Johnson and Ettinger (1991) model for subsurface vapor intrusion into buildings Experimental Quality Management. – Durham Cedar Terrace Office Park, 1997. – 62 p.



12. *Mualem Y.* Extension of the similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics // *Water Resour. Res.* – 1977. – **13**. – P. 773–780.
13. *Scanlon B. R., Milly P. C. D.* Water and heat fluxes in desert soils. Numerical simulations // *Water Resour. Res.* – 1994. – **30**. – P. 721–733.
14. *Полубаринова-Кочина П. Я.* Теория движения грунтовых вод. – Москва: Наука, 1977. – 664 с.
15. *Ивицкий А. И.* Основы проектирования и расчетов осушительных и осушительно - увлажнительных систем. – Минск: Наука и техника, 1988. – 311 с.

## References

1. *Maslov B. S., Stankevich V. S., Cherenok V. Ya.* Draining-wetting systems, Moscow: Kolos, 1981 (in Russian).
2. *Vasiliev S. V., Verigin N. N., Gleyzer B. A.* Methods of hydromelioration system calculations, Moscow: Kolos, 1970 (in Russian).
3. *Shkinkis Ts. N.* Hydrology action of drainage, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981 (in Russian).
4. *Melioration and water industry 3. Draining: reference book*, Moscow: Agropromizdat, 1985 (in Russian).
5. *Polyakov V. L., Kalugin Yu. I.*, *Dopov. NAN Ukraine*, 2016, No 6: 38–46 (in Russian).
6. *Kalyuzhnyy I. L., Pavlova K. K., Lavrov S. A.* Hydrophysiocal investigations at melioration of waterlogging lands, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988 (in Russian).
7. *Morkos N. Z.* Herald of Moscow State University, 1970, No 3: 96–101 (in Russian).
8. *Van Genuchten M. Th.* Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, **44**: 892–898.
9. *Sugak V. T.* Radiophysics and electronics, 2007, **12**, No 1: 185–191 (in Russian).
10. *Shein E. V., Arkhangelskaya T. A., Goncharov V. M.* Field and laboratory methods of for investigating physical properties and soil regimes: Methodical guidance, Moscow: Izd. Mosc. Univ., 2001 (in Russian).
11. *Mann C.* User's guide for the Johnson and Ettinger (1991) model for subsurface vapor intrusion into buildings Experimental Quality Management, Durham Cedar Terrace Office Park, 1997.
12. *Mualem Y.* *Water Resour. Res.*, 1977, **13**: 773–780.
13. *Scanlon B. R., Milly P. C. D.* *Water Resour. Res.*, 1994, **30**: 721–733.
14. *Polubarinova-Kochina P. Ya.* Theory of groundwater motion, Moscow: Nauka, 1977 (in Russian).
15. *Ivitskiy A. I.* OFundamentals of design and calculation of drainage and wetting systems, Minsk: Nauka i Technika, 1988 (in Russian).

*Поступило в редакцию 10.02.2016*

## **В. Л. Поляков**

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

*E-mail:* polyakov\_igm@list.ru

## **Про моделювання водного режиму, що регулюється, в колонці ґрунту**

*Одержано аналітичні розв'язки задач осушення і зволоження колонки ґрунту з поглибленим врахуванням впливу зони аерації на фільтраційний процес. Розраховано фільтраційні характеристики для трьох класів дрібнодисперсних ґрунтів. Показано, що спрощений опис міжзонного водообміну може призводити до значних похибок у фільтраційних розрахунках водного режиму, що регулюється.*

**Ключові слова:** ґрунт, фільтрація, вологоперенос, вологообмін, водовіддача, водонасичення, рівнинний режим.

**V.L. Polyakov**

Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kiev

*E-mail:* polyakov\_igm@list.ru

### **On the modeling of the controlled groundwater flow in a soil column**

*The analytical solutions of the problems of draining and wetting a soil column are got with regard for the aeration zone on the filtration. The filtration characteristics for three classes of fine-dispersed soils are obtained. Simplifying the description of the water exchange between two characteristic zones is shown to cause essential errors in calculations.*

**Keywords:** soil, groundwater flow, moisture, water exchange, water capacity, water saturation, water table.