

УДК 532.546

В.Л. ПОЛЯКОВ, доктор технических наук  
Институт гидромеханики НАН Украины

**РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕЙСЯ БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
К СИСТЕМАТИЧЕСКОМУ ДРЕНАЖУ ПРИ ВОДООБМЕНЕ  
С СОПРЕДЕЛЬНЫМИ СРЕДАМИ**

*Одержано строгий і наближений розв'язки стаціонарної задачі безнапорної фільтрації на фоні систематичного дренажу в гідравлічній постановці. Враховано інтенсивний водообмін в природній системі «напірний горизонт-грунтова товща-атмосфера». Виведено точно і наближено формули для визначення відстані між дренами. На багато численних прикладах наведені рішення співставляються та ілюструються розрахунками основних фільтраційних характеристик.*

**Ключові слова:** систематичний дренаж, безнапірна фільтрація, розрахунок, междренна відстань, водообмін.

*Получены строгое и приближенное решения стационарной задачи безнапорной фильтрации на фоне систематического дренажа в гидравлической постановке. Учен интенсивный водообмен в природной системе «напорный горизонт-грунтовая толща-атмосфера». Выведены точная и приближенные формулы для определения расстояния между дренами. На многочисленных примерах представленные решения сопоставляются и иллюстрируются расчетами основных фильтрационных характеристик.*

**Ключевые слова:** систематический дренаж, безнапорная фильтрация, расчет, междренное расстояние, водообмен.

*An exact and approximate solutions were obtained of a steady-state task for free groundwater flow to systematic drainage at hydraulic approach. An intensive water-exchange was taken into account within the natural system «head aquifer-soil layer-atmosphere». An exact and approximate formulae were suggested to calculate drain spacing. The solutions were compared and illustrated by calculating main groundwater characteristics at numerous examples.*

**Key words:** systematic drainage, free groundwater flow, calculation, drain spacing, water-exchange.

Весной после быстрого отвода дренажем избыточной влаги, накопившейся в почвогрунте вследствие его замерзания и снеготаяния, фильтрационный режим осушаемых земель часто стабилизируется. С поздней весны и до середины осени, включая вегетационный период, периодически устанавливается устойчивая погода. На протяжении таких периодов времени фильтрационные характеристики (напоры, уровни, расходы) обычно меняются незначительно, что оправдывает применение здесь стационарных моделей безнапорной фильтрации. Также указанные модели полезны тем, что позволяют оценивать потенциальные возможности дренажа, как основного инженерного средства регулирования водного режима почвогрунтов, его способность удерживать уровень грунтовых вод (УГВ) в оптимальных пределах даже при резких перепадах погодных и техногенных условий [1].

На реальных объектах гидромелиораций запасы грунтовых вод динамично меняются. Источниками их пополнения часто служат инфильтрационные воды, формирующиеся за счет осадков, поливов и пр., а также подземные воды в напорном горизонте. Вместе с тем, почвенная влага практически непрерывно расходуется на физическое, а в вегетационный период и на биологическое испарение. Потери влаги на испарение отчасти восполняются восходящим от УГВ потоком. Очевидно, что отмеченные приходные и расходные статьи в целом сбалансированы, но их вклады в фильтрационный режим со временем могут существенно варьироваться [2].

Однако, для анализа долговременных последствий работы дренажа, как правило, достаточно ограничиваться осредненными по характерным периодам времени показателями упомянутых статей, привлекая также информацию об их обеспеченности по годам.

Водообменные процессы в грунтовой толще зависят от положения УГВ [3]. Особенно сильно глубина залегания грунтовых вод влияет на интенсивности испарения  $\varepsilon_e$  и напорного питания  $\varepsilon_h$ . В длительные бездождевые периоды при усиленных ветре и солнечной радиации, высокой температуре воздуха испарение (эвапотранспирация) становится важной расходной статьей в водном балансе почвогрунта. При этом его скорость со временем и вдоль фильтрационного течения может существенно меняться. В расчетах дренажа данный показательный факт удается учитывать, принимая для  $\varepsilon_e$  степенную зависимость от глубины УГВ [4, 5], а именно,

$$\varepsilon_e = \varepsilon_s (h - h_k)^p. \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_s$  – некоторая стандартная скорость, которая в отсутствии значимого отбора влаги корнями растений выражается через предельную  $\varepsilon_m$  (при полном насыщении грунта водой) следующим образом

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_m}{(M - h_k)^p},$$

где  $M$  – полная мощность грунтовой толщи (от ее основания до поверхности земли),  $h_k$  – критическая глубина, при которой испарение с УГВ прекращается. С помощью (1) можно характеризовать и комплексный процесс эвапотранспирации, если скорректировать соответствующим образом содержащиеся в ней параметры. Детально влияние испарения на работу дренаж-увлажнителей изучено в [6].

При наличии в геологической структуре высоконапорного горизонта, а также гидравлической связи между ним и осушаемым грунтом возможна серьезная подпитка грунтовых вод за счет подземных. Если разделяющая их слабопроницаемая перемычка имеет мощность  $m_s$ , коэффициент фильтрации  $k_s$ , то при жестком режиме фильтрации в ней и напоре в горизонте  $h_s$  скорость перетока воды из него в грунт составит [7]

$$\varepsilon_h = \frac{k_s}{m_s} (h_s - h). \quad (2)$$

Осадки и поливная вода распределяются между поверхностным стоком и инфильтрацией. Последняя или осложняет осушение переувлажненных грунтов, или же обеспечивает более благоприятные для выращивания сельскохозяйственных культур условия в переосушенных грунтах. Основная часть инфильтрационной воды фактически проходит транзитом через зону аэрации и сравнительно быстро попадает на УГВ. И только ее малая часть временно задерживается в указанной зоне. Следует заметить, что ненасыщенная зона приобретает большое значение в

фильтрационных расчетах дренажа в периоды времени, отличающиеся неустойчивыми водно-физическими условиями в почвогрунте и сопредельных воздушной и геофильтрационной средах. При обильных осадках, подпочвенном увлажнении, усиленном осушении грунта данная зона способна аккумулировать или отдавать значительное количество влаги. Интенсивно протекающий при этом процесс влагопереноса описывается нестационарной и существенно нелинейной математической моделью, которая включает две эмпирические гидрофизические характеристики. В остальное же время зону выше УГВ можно вообще исключать из рассмотрения, а ее влияние на работу дрен учитывать уточнив значения коэффициентов в выражении (1) и скорость инфильтрации на УГВ  $\varepsilon_w$ .

Принимая во внимание все вышеупомянутые статьи водного баланса, уравнение установившейся безнапорной фильтрации в гидравлическом приближении представляется следующим образом

$$k \frac{d}{dx} \left( h \frac{dh}{dx} \right) = f(h), \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации почвогрунта,  $h$  – отметка УГВ над абсолютным или частичным водоупором,  $f(h) = \varepsilon_e(h) - \varepsilon_h(h) - \varepsilon_w$ . С учетом гидродинамического и конструктивного несовершенства дренажа граничные условия на дрене и междренье принимают соответственно такой вид [8]

$$x = 0, \quad h^2 - 2\Phi \frac{dh^2}{dx} = m_d^2; \quad (4)$$

$$x = L, \quad \frac{dh}{dx} = 0; \quad (5)$$

где  $L$  – половина расстояния между дренами,  $\Phi$  – фильтрационное сопротивление.

В ходе решения задачи (3)-(5) введены как дополнительные параметры значения искомой функции  $h$  на дрене (обозначается  $h_0$ ) и на междренье ( $h_L$ ). Процедуры получения сначала строгого, а затем и приближенного решений данной задачи опускаются. Точное решение найдено в интегральной параметрической форме. В частности, свободная поверхность описывается уравнением

$$x = L + \int_{h_L}^h \frac{\eta d\eta}{\sqrt{2F(\eta; h_L)}}. \quad (6)$$

Здесь  $F(\eta; h_L) = \int_{h_L}^{\eta} \xi \bar{f}(\xi) d\xi$ ,  $\bar{f} = \frac{f}{k}$ . Параметры  $h_0$ ,  $h_L$  следует определять из

системы уравнений, которые выведены с использованием условий (4), (5) и уравнения (6), а именно,

$$\int_{h_0}^{h_L} \frac{\eta d\eta}{\sqrt{2F(\eta; h_L)}} = L, \quad (7)$$

$$h_0^2 - 4\Phi \sqrt{2F(h_0; h_L)} = m_d^2. \quad (8)$$

Благодаря применению предназначенных для решения прикладных задач и инженерных расчетов пакетов программ математического анализа (Mathcad, Matlab и др.) функция  $h(x)$  легко рассчитывается на основе (6). Незначительные трудности в вычислениях фильтрационных характеристик возникают при решении системы (7), (8). Пара значений  $h_0, h_L$  просто находится графическим способом, но более надежен здесь итерационный метод. Применять его в данной ситуации рекомендуется следующим образом. Первое приближение  $(h_{01}, h_{L1})$  определяется с использованием допущения

$$f(h) = f(h_L). \quad (9)$$

Тогда  $h_{01}$  выражается через  $h_{L1}$  таким образом

$$h_{01}(h_{L1}) = \sqrt{h_{L1}^2 + \frac{L^2}{2} \bar{f}(h_{L1})}, \quad (10)$$

а значение  $h_{L1}$  следует вычислять подбором из уравнения относительно него

$$h_{01}^2(h_{L1}) - 4\Phi \sqrt{2F(h_{01}(h_{L1}), h_{L1})} = m_d^2. \quad (11)$$

При известном  $h_{L1}$  далее из (10) находится значение  $h_{01}$ . Затем оно подставляется в уравнение (7) и ищется удовлетворяющее его значение  $h_{L2}$ , которое относится уже ко второму приближению. Дополняется это значение отметкой  $h_{02}$ , определяемой подбором из уравнения (8) при  $h_L = h_{L2}$ . Последующая итерационная процедура базируется исключительно на уравнениях (7), (8). Поочередно и при необходимости многократно вычисляются все более точные значения  $h_L$  из (7) при известном из предыдущего приближения значении  $h_0$ . Контролируется итерационный процесс путем сравнения последнего и предыдущего приближений. Если дренаж совершенный ( $\Phi = 0$ ), то  $h_0 = m_d$  и  $h_L$  сразу находятся из уравнения (7).

Важным следствием построенного решения является формула для расчета одностороннего погонного расхода дрены  $q$

$$q = k \left( h \frac{dh}{dx} \right)_{x=0} = k \sqrt{2F(h_0, h_L)}. \quad (12)$$

Значительный интерес для практики осушения переувлажненных земель представляет установление междреннего расстояния  $2L$  (или расстояния  $L$ ). В случае установившейся фильтрации достаточно изначально задаться нормой осушения  $S_0$ , которой при мощности грунтовой толщи  $M$  соответствует отметка  $h_*$  (равна  $M - S_0$ ). Обычно от дренажа требуется обеспечить норму осушения на междренье, что может стать причиной переосушения почвогрунта вблизи дрен. По видимому для сельскохозяйственного производства лучше добиваться снижения УГВ до отметки  $M - S_0$  на всем междреннем пространстве в среднем. Но если все-таки использовать общепринятый подход, то расстояние  $L$  следует

вычислять в два этапа. Сначала при известном значении  $h_L$  (равно заданному  $h_*$ ) из (8) находятся  $h_0$ , а затем из (7) искомое  $L$ .

Моделирование установившейся безнапорной фильтрации к систематическому дренажу осложняется из-за криволинейности свободной поверхности, неравномерности и нелинейного характера водообмена между грунтовой толщей, напорным горизонтом и атмосферой. Так как строгое решение исходной задачи имеет интегральную форму, а расчеты с его помощью фильтрационного режима на фоне несовершенного дренажа оказываются весьма трудоемкими, то представляет интерес вывод и сравнительный анализ более простых расчетных зависимостей. Традиционно нелинейные фильтрационные модели упрощаются путем замены переменных величин их средними или эффективными величинами. При исследованиях безнапорной фильтрации аналитическими методами, как правило, прибегают к линеаризации модели, вводя в нее среднюю мощность фильтрационного потока  $m_c$ . В случае несовершенного дренажа указанную мощность логично принимать равной  $(h_0 + h_L)/2$ , а значит в вычислениях опять будут фигурировать те же два неизвестных параметра, а основные усилия придется направить на их определение. При этом сохранится интегральная форма решения. Если же функция водообмена является линейной благодаря линеаризации ее базового нелинейного выражения, или в соответствии с эмпирической информацией об испарении и напорном питании грунтовых вод, то зависимости для фильтрационных характеристик будут содержать только элементарные функции.

Пусть, таким образом  $p = 1$ , так что  $f(h) = ah + b$ , где согласно (1) и (2)

$$a = \varepsilon_s + \frac{k_s}{m_s}, \quad b = -\varepsilon_w - \frac{k_s}{m_s} h_s - \varepsilon_s h_k. \quad (13)$$

Тогда зависимость для расчета свободной поверхности может быть дана в следующих двух эквивалентных формах

$$x = L + \sqrt{\frac{km_c}{a}} \ln \frac{\sqrt{a^2 h^2 + 2abh - a^2 h_L^2 - 2abh_L} + ah + b}{ah_L + b}, \quad (14)$$

$$h(x) = \frac{1}{2a\varphi(x)} \left\{ [\varphi(x) - b]^2 + a^2 h_L^2 + 2abh_L \right\} \quad (15)$$

где  $\varphi(x) = (ah_L + b) \exp\left(-\sqrt{\frac{a(L-x)^2}{km_c}}\right)$ . Определять же значения  $h_0$ ,  $h_L$

предлагается из такой системы уравнений

$$h_0 = \frac{1}{2a\varphi_0(h_L, m_c)} \left\{ [\varphi_0(h_L, m_c) - b]^2 + a^2 h_L^2 + 2abh_L \right\} \quad (16)$$

$$h_0 - m_d = \frac{2\Phi}{\sqrt{km_c}} \sqrt{ah_0^2 + 2bh_0 - ah_L^2 - 2bh_L}, \quad (17)$$

где  $\varphi_0 = \varphi(0)$ . Полагая приближенно  $m_c \approx (m_d + h_L)/2$ , последовательно находят  $h_L$  из (17) с учетом представления (16),  $h_0$  из (16) при известном  $h_L$  и  $h(x)$  по (15). Если теперь  $h_0, h_L$  известны, то расход  $q$  рассчитывается по формуле

$$q = \sqrt{\frac{k}{2}(h_0 + h_L)(a_0 h_0^2 + 2bh_0 - ah_L^2 - 2bh_L)}. \quad (18)$$

Расстояние  $L$  предлагается приближенно определять по формуле

$$L = -\sqrt{\frac{km_c}{a}} \ln \left[ \frac{f(h_0(S_0))}{f(S_0)} - \sqrt{\frac{f^2(h_0(S_0))}{f^2(S_0)} - 1} \right]. \quad (19)$$

Здесь  $f(S_0) = a(M - S_0) + b$ ,  $h_0(S_0)$  следует вычислять с использованием равенства

$$h_0(S_0) = \frac{2\Phi^2}{4a\Phi^2 - km_c}. \quad (20)$$

$$\cdot \left\{ \sqrt{\left(2b + \frac{km_d m_c}{2\Phi^2}\right)^2 + 4\left(a - \frac{km_c}{4\Phi^2}\right) \left[ a(M - S_0)^2 + 2b(M - S_0) + \frac{km_d^2 m_c}{4\Phi^2} \right]} - 2b - \frac{km_d m_c}{2\Phi^2} \right\}.$$

Проце  $L$  устанавливается, если в (20) принимать приближенное значение  $m_c$ . Тогда из (20) при заданном  $S_0$  сразу находится  $h_0$ , которое затем подставляется в (19) и легко вычисляется  $L$ . Если же  $m_c$  выбирать аккуратнее, как среднее значений  $h_0, h_L$ , то  $h_0$  подбирается из (20) и из (19) рассчитывается  $L$ .

В целом благодаря доступности предназначенных для прикладных исследований современных пакетов программ математического анализа предпочтительнее для инженерных расчетов дренажа точное решение задачи (3)-(5), выраженное уравнениями (6)-(8). Решение же аналогичной линеаризованной задачи удобнее при упрощенном выборе  $m_c$ , когда при определении  $h_0, h_L$  отпадает необходимость в итерационной процедуре.

Расчетные формализмы удастся значительно упростить, если принять допущение о равномерности водообмена на всем междренном пространстве (9). Тогда в случае осушительного дренажа влияние испарения и напорного питания на фильтрационный режим будет несущественно переоцениваться, а при подпочвенном увлажнении несколько недооцениваться. Положение УГВ между дренами при таком подходе описывается уравнением

$$h(x) = \sqrt{m_d^2 + (x^2 - 2Lx - 4\Phi L) \cdot \bar{f}(h_L)}, \quad (21)$$

а его отметку на междренье следует находить из уравнения

$$(L^2 + 4\Phi L) \cdot \bar{f}(h_L) + h_L^2 = m_d^2. \quad (22)$$

Если функция водообмена линейная, то  $h_L$  вычисляется непосредственно по формуле

$$h_L = -\frac{\bar{a}}{2}(L^2 + 4\Phi L) + \sqrt{\frac{\bar{a}^2}{2}(L^2 + 4\Phi L)^2 - \bar{b}(L^2 + 4\Phi L)}, \quad (23)$$

где  $\bar{a} = a/k$ ,  $\bar{b} = b/k$ . Приведенный односторонний погонный расход дрены будет

$$\bar{q} = \frac{q}{k} = -L\bar{f}(h_L). \quad (24)$$

Наконец, при заданной норме осушения  $S_0$  расстояние  $L$  предлагается определять по простой формуле

$$L = \sqrt{4\Phi^2 - \frac{(M - S_0)^2 - m_d^2}{\bar{f}(S_0)}} - 2\Phi. \quad (25)$$

При выполнении количественного анализа акцент был сделан на совершенном дренаже, уложенном на водоупор в маломощном однородном слое грунта ( $m_d = 0$ ), причем междреннее расстояние составило 16 м. В подобной ситуации применявшиеся выше упрощения исходной математической модели приводят к максимальным ошибкам в расчетах его действия. Дополнительно рассмотрено осушение мощной толщи грунта систематическим дренажем с расстоянием  $L = 25$  м, который расположен над частичным водоупором на высоте 10 м. Для сокращения числа модельных параметров принималось во внимание только гидродинамическое несовершенство осушительного дренажа, а соответствующее фильтрационное сопротивление с незначительным превышением вычислялось по известной формуле [9, 10]

$$\Phi = \frac{m_c}{\pi} \ln \frac{m_c}{\pi r_d}, \quad (26)$$

причем радиус дрены  $r_d$  принимался равным 0,05 м.

Рассчитано множество примеров с целью, во-первых, иллюстрации практического использования полученного точного решения стационарной нелинейной фильтрационной задачи, во-вторых, оценки погрешностей в вычислениях вследствие осреднения мощности фильтрационного потока и принятия постоянного эффективного значения скорости водообмена согласно (9). Изначально функция водообмена считалась линейной, а ее приведенные коэффициенты  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$  варьировались так, чтобы охватить диапазоны их возможных значений. Для коэффициента  $\bar{a}$  выбраны три характерных значения  $(0.001, 0.002, 0.005 \text{ м}^{-1})$ , а второй коэффициент непрерывно менялся от  $-0.05$  до  $0$ . Предметом расчетов стали положение УГВ, односторонний погонный расход дрен и расстояние между ними. Проводились они преимущественно по точным зависимостям, но вместе с тем привлекались и приближенные.

В первую очередь определялась свободная поверхность по строгой формуле (6). Предварительно вычислялись отвечающие исходным данным значения  $h_L$  и в случае несовершенства дренажа  $h_0$  из уравнений (7), (8).



Кроме того, положение УГВ находилось приближенно двумя способами: или с помощью (21), (23) при эффективном водообмене, или по формуле (15) с привлечением (16) для определения  $h_L$ . Полученные таким образом результаты представлены на рис.1, 2. Так, на рис.1 изображено семейство кривых, описывающих совокупность отметок УГВ на междренье при разнообразных условиях водообмена в природной системе «горизонт-грунт-атмосфера». Здесь величина  $h_L$  рассматривалась как функция от постоянной составляющей в линейном представлении  $f(\bar{h})$ . Приближенные кривые, рассчитанные при  $m_d = 0$  по формулам (15), (21), фактически слились с изображенными на рисунке точными кривыми. Таким образом, приближенные подходы обеспечили здесь определение УГВ посередине между дренами с минимальной ошибкой. Однако, в других сечениях фильтрационного потока и особенно на удалении от междренья, как свидетельствует рис.2, имеет место серьезное расхождение между точными и приближенными отметками УГВ.

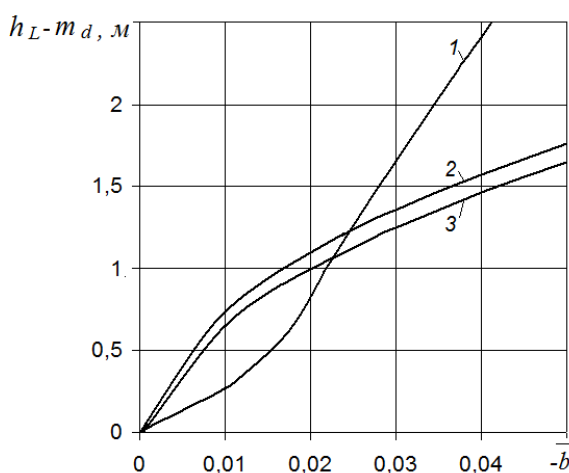


Рис.1. Зависимость превышения УГВ на междренье  $h_L - m_d$  от  $-b$ :  
**1, 2** –  $\bar{a} = 0.001$ ; **3** –  $\bar{a} = 0.005$ ;  
**1** –  $m_d = 10\text{ м}$ ; **2, 3** –  $m_d = 0$

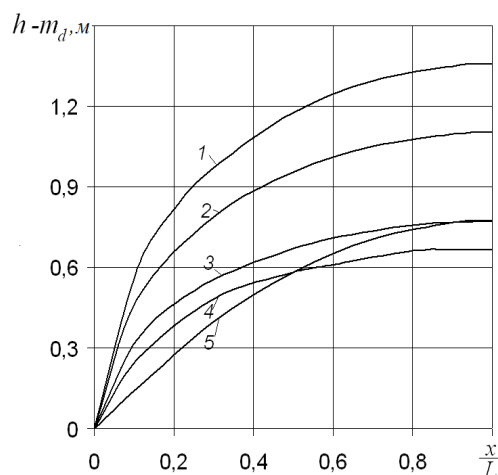


Рис.2. Превышение УГВ над уровнем дрены: **1-3, 5** –  $\bar{a} = 0.001$ ; **4** –  $\bar{a} = 0.005$ ;  
**1** –  $\bar{b} = -0.03$ ; **2** –  $\bar{b} = -0.02$ ;  
**3-5** –  $\bar{b} = -0.01$ ; **1-4** – нелинейная модель; **5** – линейная

Естественно, что в такой же степени отличаются и уклоны свободных поверхностей, что стало причиной значительного отклонения приближенных значений приведенного дренажного расхода от точных. Данные вычислений приведенной величины  $\bar{q}$  также в зависимости от  $\bar{b}$  и  $\bar{a}$  показаны на рис.3. Судя по ним, погрешность в ее расчетах может достигать 10% при малых значениях  $\bar{b}$  и использовании эффективного значения водообмена, а при линеаризации исходной задачи превышать 30%.

Так как оба применявшиеся приема упрощения исходной модели снижают точность определения УГВ на междренье незначительно, то предназначенные для обоснования междреннего расстояния точная

формула (7) и приближенные (19), (25) оказываются почти равноценными. Тем не менее, предпочтение следует отдать точной, поскольку вычисление  $L$ , хотя и выполняется в два этапа, но непосредственно по простым формулам – сначала находится  $h_0$  (значение  $h_L$  задается), а затем  $L$ . Более того, в случае совершенного дренажа известно заранее и значение  $h_0$ , так что искомое расстояние сразу находится по (7). Кроме того, данная формула является строгой в рамках гидравлической теории и поэтому гарантирует безошибочность расчетов (если указанная теория в рассматриваемых условиях справедлива) при любых значениях коэффициентов в функции водообмена, в том числе и при неисследованных значениях  $p$ , которые согласно экспериментальным данным могут существенно превышать 1 [4]. Результаты вычислений расстояния  $L$  при  $m_d = 0$  и двух значениях  $\bar{a}$  даны на рис.4. Кривые 1-3 отвечают одному значению  $\bar{a}$ , а их близость указывает на низкую чувствительность  $L$  по отношению к приемам упрощения.

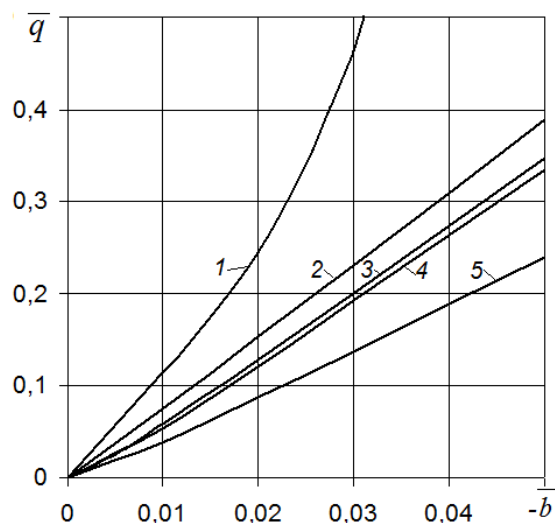


Рис.3. Зависимость  $\bar{q}$  от  $-\bar{b}$ :

- 1 –  $m_d = 10\text{м}$ ; 2-5 –  $m_d = 0$ ;  
 1, 2 –  $\bar{a} = 0.001$ ; 3-5 –  $\bar{a} = 0.005$ ;  
 1-3 – точн.; 4, 5 – пригл.

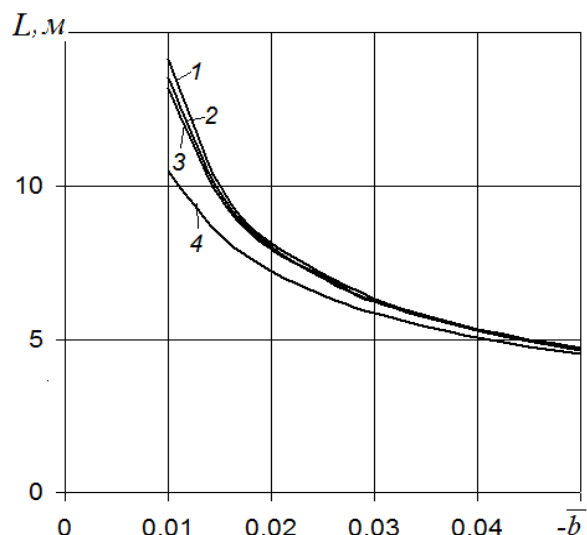


Рис.4. Зависимость  $L$  от  $-\bar{b}$ :

- 1-3 –  $\bar{a} = 0.005$ ; 4 –  $\bar{a} = 0.001\text{м}^{-1}$ ;  
 1 – эффективный водообмен;  
 2, 4 – точн. расчет; 3 – линейар.

### Выводы

В условиях стабильного интенсивного водообмена в природной системе «напорный горизонт-грунтовая толща-атмосфера» действие дренажа нередко способствует существенному искривлению свободной поверхности грунтовых вод и, как следствие, выраженной неравномерности испарения и напорного питания вдоль фильтрационного течения, что в свою очередь отражается на приточности к дренам, уровненом режиме.

Аналитическими методами получены строгое и приближенное решения стационарной задачи безнапорной фильтрации на фоне систематического дренажа в гидравлической постановке. При наличии достоверной информации о закономерностях обмена между грунтовыми, напорными,

поверхностными водами и атмосферой точные расчетные зависимости дают возможность надежно и всесторонне оценивать устойчивый осушительный или увлажнительный эффект на дренажных системах двухстороннего действия в течение всего теплого времени года.

Особую ценность для практики дренажа представляют формулы, предназначенные для определения расстояния между дренами, при котором обеспечивается оптимальная глубина грунтовых вод в центре области фильтрации, где отметка УГВ максимальная. Предложенные точная и приближенные формулы дают близкие результаты. Однако, для инженерных расчетов предпочтительнее точная как более надежная и не требующая выполнения трудоемких вычислений.

Несмотря на интегральную форму строгого решения и вытекающих из него расчетных зависимостей, несложно с их помощью и проводить теоретический анализ установившегося действия осушительно-увлажнительного дренажа, и выбирать его рациональные параметры благодаря применению современных пакетов программ математического анализа.

#### **Список литературы**

1. *Эггельсман Р.* Руководство по дренажу. М.: Колос, 1984. 247 с.
2. *Лебедев А.В.* Методы изучения баланса грунтовых вод. Москва: Недра, 1976. 223 с.
3. *Шкиннис Ц.Н.* Гидрологическое действие дренажа. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 311 с.
4. *Аверьянов С.Ф.* Фильтрация из каналов и её влияние на режим грунтовых вод. М.: Колос, 1982. 237 с.
5. *Полубаринова-Кочина П.Я.* Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
6. *Поляков В.Л.* Расчет установившегося действия системы дренаж-увлажнителей в условиях интенсивного испарения // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА. Вип.20. С.80-87.
7. *Полубаринова-Кочина П.Я., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н.* Математические методы в вопросах орошения. М.: Наука, 1969. 414 с.
8. *Олейник А.Я., Поляков В.Л.* Дренаж переувлажненных земель. – К.: Наук. думка, 1987. 280с.
9. *Олейник А.Я.* Геогидродинамика дренажа. К.: Наук. думка, 1981. 284 с.
10. *Шестаков В.М.* Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. М.: Изд-во МГУ, 1965. 233 с.

*Надійшло до редакції 20.11.2016*