

УДК 532.546:631.62

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

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ДРЕН-УВЛАЖНИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИСПАРЕНИЯ

Сформульовано в гідравлічному наближенні і строго розв'язано математичну задачу усталеного підґрунтового зволоження ґрунту в умовах загального випаровування, інтенсивність якого залежить від глибини стояння ґрунтових вод. Розв'язок проілюстровано багаточисленними розрахунками рівня ґрунтових вод і міждренної відстані. Показано виправданість використання в інженерних розрахунках на території, яка зволожується, швидкості випаровування на міждренні, важливість правильного вибору закону випаровування із ґрунту.

Ключові слова: випаровування, рівень ґрунтових вод, глибина, міждренна відстань, зволоження, ґрунт.

Сформулирована в гидравлическом приближении и строго решена математическая задача установившегося подпочвенного увлажнения грунта в условиях суммарного испарения, интенсивность которого зависит от глубины стояния грунтовых вод. Решение проиллюстрировано множеством расчетов уровня грунтовых вод и междренного расстояния. Показана правомочность использования в инженерных расчетах на увлажняемой территории скорости испарения на междренье, важность правильного выбора закона испарения.

Ключевые слова: испарение, уровень грунтовых вод, глубина, междреннее расстояние, увлажнение, грунт.

A mathematical task has been formulated and exactly solved of steady-state soil wetting by drain system when evapotranspiration was connected with water-table depth. Numerous calculations have been performed of water-table position and distance between drains. Validity of minimal evapotranspiration rate application, importance of evaporation law correct choice have been shown.

Key words: evaporation, water-table, depth, distance between drains, wetting, soil.

Испарение является важной статьей водного баланса природных пористых сред. На покрытых растительностью землях оно складывается из

испарения с их поверхности (физическое испарение) и потребления корнями растений (транспирация) [1-3]. В практике земледелия грунты оказываются полностью насыщенными водой, а физическое испарение равным максимальному – испаряемости ε_* только в исключительных случаях. Гораздо чаще в их толще можно выделить две характерные зоны – насыщенную и ненасыщенную, разделенные свободной поверхностью (уровнем грунтовых вод, сокращенно УГВ). Влагосодержание в зоне аэрации, транспирация и физическое испарение тесно связаны с глубиной залегания грунтовых вод, то есть УГВ [4-7]. Поэтому в теоретических исследованиях установившегося действия мелиоративного дренажа основной целью становится надежное определение положения УГВ с учетом суммарного испарения (эвапотранспирации). В соответствии с рекомендациями работ [4, 8, 9] для скорости испарения ε_e оправдано принимать зависимость от глубины УГВ или отвечающего ей пьезометрического напора h в степенной форме

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

где ε_{e0} – стандартная скорость (при $h - h_k = 1$); h_k – критический напор (уровень), при котором отток влаги со свободной поверхности в зону аэрации прекращается; δ – эмпирический коэффициент, обычно полагаемый для разных типов грунта равным 1, 2 или 3. Из (1) следует, что

$$\varepsilon_* = \varepsilon_{e0}(M - h_k)^\delta, \quad (2)$$

где M – мощность увлажняемого грунта (отсчет уровней от водоупора).

Чтобы обеспечить на значительных территориях благоприятные для роста сельскохозяйственных культур водно-физические условия при интенсивном испарении широко применяются системы увлажнительных дрен. При этом стремятся их проектировать и эксплуатировать рациональным образом с тем, чтобы обеспечить оптимальную влажность в корнеобитаемом слое, которой соответствует строго определенный УГВ. В действительности оптимальный водный режим в почвогрунтах достигается благодаря поддержанию в течение длительного времени в дренах-увлажнителях надлежащего повышенного напора. Однако, в результате этого влагозапасы в междренном пространстве распределяются неравномерно, а глубина УГВ между дренами ощутимо меняется. Как следствие, изменяется и испарение, а наихудшие для растений водно-физические условия складываются посередине между дренами. Поэтому в теоретических разработках действия трубчатых увлажнителей особое внимание уделяется установлению положения УГВ именно на междренье.

В основу количественного анализа увлажнения недеформируемого однородного грунта систематическим дренажем может быть положена математическая модель установившейся безнапорной фильтрации, включающая стационарное уравнение

$$k \frac{d}{dx} \left(h \frac{dh}{dx} \right) - \varepsilon_{e0} (h - h_k)^\delta = 0 \quad (3)$$

и граничные условия

$$x = 0, \quad h = H_d; \quad x = L, \quad \frac{dh}{dx} = 0, \quad (4)$$

где k – коэффициент фильтрации, H_d – напор в дренах, L – половина междреннего расстояния. Точное решение задачи (3), (4) удалось получить в интегральной форме для произвольного значения δ . Для этого прежде всего была выполнена замена

$$p(h) = \frac{dh}{dx}.$$

Тогда уже относительно функции $p(x)$ исходная задача приняла вид

$$hp \frac{dp}{dh} + p^2 = \bar{\varepsilon}_{e0} (h - h_k)^\delta, \quad (5)$$

$$x = L, \quad p = 0, \quad h = H_L, \quad (6)$$

где $\bar{\varepsilon}_{e0} = \varepsilon_{e0}/k$, H_L – напор на междренье, который пока неизвестен и должен быть найден в ходе решения задачи. Из (5), (6) для $p(x)$ получено выражение

$$p = \frac{dh}{dx} = - \sqrt{\frac{2\bar{\varepsilon}_{e0}}{h^2} \int_{H_L}^h \xi (\xi - h_k)^\delta d\xi}. \quad (7)$$

Интегрирование (7) с привлечением первого условия (4) дает искомое решение в виде обратной функции

$$x = \frac{1}{\sqrt{2\bar{\varepsilon}_{e0}}} \int_h^{H_d} \frac{\xi d\xi}{\int_{H_L}^\xi \eta (\eta - h_k)^\delta d\eta}. \quad (8)$$

Искомая величина H_L находится из уравнения

$$L = \frac{1}{\sqrt{2\bar{\varepsilon}_{e0}}} \int_{H_L}^{H_d} \frac{\xi d\xi}{\int_{H_L}^\xi \eta (\eta - h_k)^\delta d\eta}. \quad (9)$$

Это уравнение имеет большое практическое значение, так как позволяет непосредственно обосновывать ключевой конструктивный параметр ($2L$) при заданных напорах (уровнях) H_d , H_L .

Расчетные уравнения (8), (9) несложно представить и в безразмерной форме, введя в качестве масштаба длины L , так что $\bar{h} = h/L$, $\bar{x} = x/L$, $\bar{H}_{d,L} = H_{d,L}/L$, $\bar{h}_k = h_k/L$. Тогда, например, (9) примет вид

$$\int_{\bar{H}_L}^{\bar{H}_d} \frac{\xi d\xi}{\int_{\bar{H}_L}^{\xi} \eta(\eta - \bar{h}_k)^\delta d\eta} = \sqrt{2\bar{\varepsilon}_e} = \sqrt{\frac{2\bar{\varepsilon}_*}{(\bar{M} - \bar{h}_k)^\delta}}. \quad (10)$$

где $\bar{\varepsilon}_{e0} = \bar{\varepsilon}_{e0} L^\delta$. Построенное выше решение, несмотря на его весьма сложную форму, дает возможность легко определять напор (уровень грунтовых вод), междреннее расстояние, если привлечь один из стандартных пакетов программ математического анализа (Mathcad, Matlab, Mathematics и др.). Вместе с тем его целесообразно использовать и для проверки правомочности применения в фильтрационных расчетах для обобщений различных приближенных формул.

В частности, с помощью указанного решения несложно показать возможность упрощенного описания процесса испарения, что позволит существенно расширить круг задач дренажа, решаемых аналитическими методами. Далее предполагается, что интенсивность испарения всюду между дренами одинаковая и равна интенсивности на междренье [10]. Таким образом

$$\varepsilon_e \approx \varepsilon_{e0} (H_L - h_k)^\delta = \text{const}. \quad (11)$$

Тогда решение исходной задачи (3), (4) существенно упрощается и будет

$$h(x) = \sqrt{H_d^2 + \bar{\varepsilon}_{e0} (H_L - h_k)^\delta (x^2 - 2Lx)}. \quad (12)$$

Таким образом, относительный уровень $\bar{H}_L$ находится из зависимости (12) при $\bar{x} = 1$. Соответствующее уравнение будет

$$\bar{H}_L^2 + \bar{\varepsilon}_* \left(\frac{\bar{H}_L - \bar{h}_k}{\bar{M} - \bar{h}_k} \right)^\delta = \bar{H}_d^2, \quad (13)$$

где $\bar{\varepsilon}_* = \varepsilon_*/k$, $\bar{M} = M/L$. Последовательно рассматриваются три частных случая.

Пусть $\delta = 0$, так что испарение равно испаряемости. Тогда

$$\bar{H}_L = \sqrt{\bar{H}_d^2 - \bar{\varepsilon}_*}. \quad (14)$$

Если же $\delta = 1$, то

$$\bar{H}_L = \sqrt{\bar{H}_d^2 + \frac{\bar{\varepsilon}_*^2}{4(\bar{M} - \bar{h}_k)^2} + \frac{\bar{\varepsilon}_* \bar{h}_k}{\bar{M} - \bar{h}_k} - \frac{\bar{\varepsilon}_*}{2(\bar{M} - \bar{h}_k)}}. \quad (15)$$

Наконец, при $\delta = 2$

$$\bar{H}_L = \frac{\bar{\varepsilon}_* \bar{h}_k + \sqrt{\bar{\varepsilon}_*^2 \bar{h}_k^2 + \left[\bar{H}_d^2 (\bar{M} - \bar{h}_k)^2 - \bar{\varepsilon}_* \bar{h}_k^2 \right] \left[(\bar{M} - \bar{h}_k)^2 + \bar{\varepsilon}_* \right]}}{(\bar{M} - \bar{h}_k)^2 + \bar{\varepsilon}_*}. \quad (16)$$

Приближенная формула для вычисления междреннего расстояния вытекает из (12) и имеет вид

$$L = \sqrt{\frac{H_d^2 - H_L^2}{\bar{\varepsilon}_*} \left(\frac{M - h_k}{H_L - h_k} \right)^\delta} \quad (17)$$

Количественный анализ выполнялся на примерах с типичными исходными данными и преследовал такие три цели – проиллюстрировать применение точных расчетных выражений, обосновать правомерность осреднения испарения при моделировании увлажнения системой дрен; оценить значимость для увлажнительного мероприятия правильного выбора закона испарения.

Предметом вычислений стали профили относительного напора $\bar{h}(x)$, относительный уровень грунтовых вод на междренье $\bar{H}_L$, расстояние между дренами $2L$. Во всех примерах принималось $h_k = 0$ (испарение прекращалось при сработке грунтовых вод); в первых двух сериях полагалось $\bar{H}_d = 0,1$; приведенная испаряемость или фиксировалась (0.005), или менялась в широких пределах (от 0 до 0,01).

В первую очередь находились распределения напора между двумя увлажнителями по точной (8) и приближенной (12) формулам при $\delta = 0; 1; 2$ (рис.1).

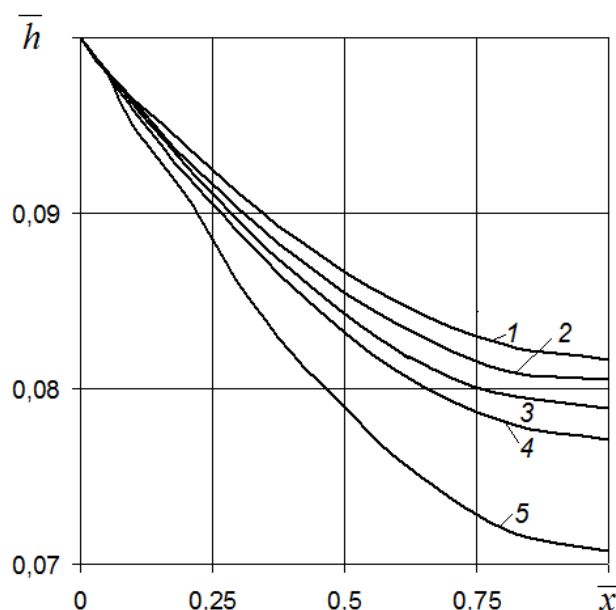


Рис.1. Распределение приведенного напора в области движения:
1 – $\delta = 0$; 2; 3 – $\delta = 1$; 4; 5 – $\delta = 2$; 2; 4 – точн.; 3; 5 – пригл.

Максимальное испарение ($\varepsilon_e = \varepsilon_*$) существенно снизило эффективность увлажнения, так что насыщенная зона на междренье практически отсутствовала (кривая 1). С другой стороны, резкое снижение

испарения с увеличением глубины грунтовых вод обуславливает существование уже значимого УГВ на всем пространстве между дренами. Принятие постоянного минимального испарения приводит в целом к незначительному повышению УГВ. Также положение УГВ на междренье рассчитывалось в зависимости от испаряемости $\bar{\varepsilon}_*$. Соответствующие графики функции $\bar{H}_L(\bar{\varepsilon}_*)$, построенные с помощью уравнения (10) и формул (14)-(16), изображены на рис.2. Влияние $\bar{\varepsilon}_*$ серьезно усиливается при $\delta = 0$ и $\bar{\varepsilon}_* > 0,006$. В других случаях ($\delta = 1; 2$) $\bar{H}_L$ с уменьшением $\bar{\varepsilon}_*$ плавно снижается. Использование в расчетах $\bar{H}_L$ постоянной минимальной скорости испарения ведет к погрешностям порядка 5%.

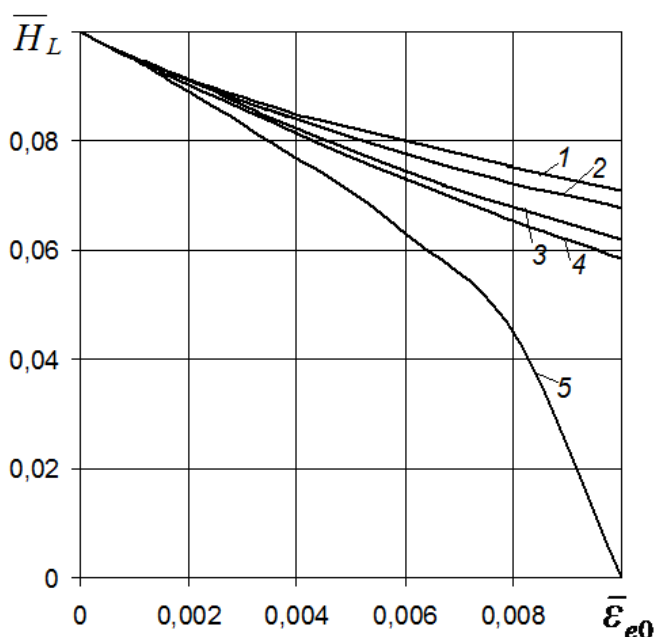


Рис.2. Зависимость $\bar{H}_L(\bar{\varepsilon}_{e0})$:

1; 2 – $\delta = 2$; 3; 4 – $\delta = 1$; 5 – $\delta = 0$; 1; 3 – прибл.; 2; 4 – точн.

В заключение определялось междреннее расстояние как функция от напора на дрене H_d по формулам (9), (17). При этом полагалось, что оптимальный УГВ на междренье находится на глубине 0,6 м, так что при $M = H_d$ и $H_L = H_d - 0,6$, м; $\bar{\varepsilon}_*$ имела единственное значение. Точные в рамках принятой математической модели и приближенные кривые $L(H_d)$ приведены на рис.3. Величина L оказалась менее чувствительной к δ , чем уровни. Вместе с тем, увеличение мощности фильтрационного потока позволяет существенно разредить дренаи. Допущение о постоянстве испарения обусловило в расчетах междренного расстояния следующие ошибки: около 6 % при $\delta = 2$ и примерно 3,5 % при $\delta = 1$.

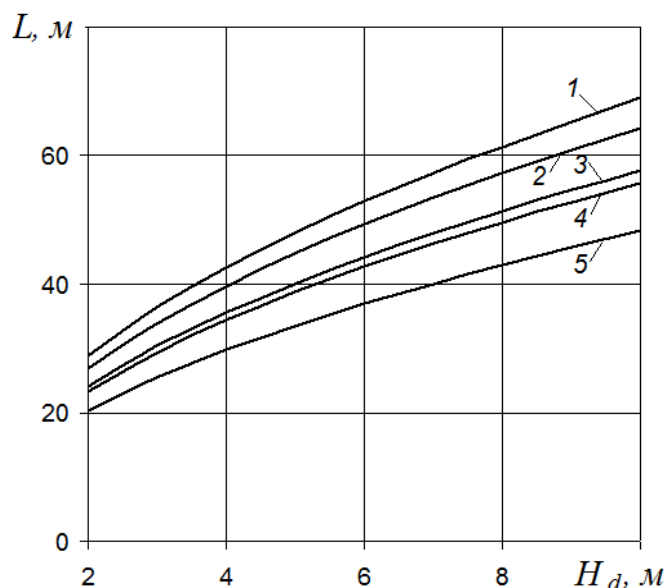


Рис.3. Зависимость $L(H_d)$:

1; 2 – $\delta = 2$; 3; 4 – $\delta = 1$; 5 – $\delta = 0$; 1; 3 – точн.; 2, 4 – прибл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительное испарение воды с поверхности грунта без адекватного восполнения влагозапасов ведет к его переосушению. Рациональная подача воды в грунт посредством системы дрен-увлажнителей способна обеспечить благоприятные для произрастания культурных растений водно-физические условия. Вследствие зависимости испарения от глубины стояния грунтовых вод и искривленности свободной поверхности оно ощутимо меняется на увлажняемой территории. Строгое решение математической задачи установившегося подпочвенного увлажнения в гидравлической постановке позволило аккуратно учесть отмеченный переменный характер испарения. Указанное решение сопоставлено с решением аналогичной задачи, но при уже постоянной минимальной скорости испарения, которая имеет место посередине между дренами. В результате установлено, что подобное допущение вносит в расчеты уровней, междреннего расстояния погрешности порядка 5 %. Поскольку же точное решение позволяет с помощью стандартных пакетов программ математического анализа просто вычислять фильтрационные характеристики и конструктивные параметры, то именно оно может быть рекомендовано для инженерных целей. Вместе с тем для последующих обобщений целесообразно использовать существенно более простое и близкое к точному приближенное решение.

Список литературы

1. *Духовный В.А., Баклушин М.Б., Томин Е.Д., Серебренников Ф.В.* Горизонтальный дренаж орошаемых земель. – М.: Колос, 1979. – 225с.
2. *Gardner W.R., Fairman N.* Laboratory studies of evaporation from soil column in the presence of a water table. – Soil Sci. – 1958. – 85, № 5. – P.75-89.

3. *Winter T.C., Rosenberry D.O., Sturrock A.V.* Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central United states // *Water Resour. Res.* – 1995. – 31, № 4. – P.983-993.
4. *Аверьянов С.Ф.* Фильтрация из каналов и её влияние на режим грунтовых вод. – М.: Колос, 1982. – 237с.
5. *Островский В.Н.* К методике расчета испарения грунтовых вод // *Водные ресурсы.* – 1979. – № 3. – С.77-83.
6. *Харченко С.И.* Управление водным режимом на мелиорируемых землях в Нечерноземной зоне. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 239 с.
7. *Shih S.F.* Soil surface evaporation and water table depths // *J.Irrig.Drain.Engrg., ASCE.* – 1983. – 109, № 4. – P.366-376.
8. *Митин В.Ф.* Метод расчета динамики грунтовых вод при осушении почвогрунтов. – В кн.: Новые методы расчета режима осушения земель и усовершенствования конструкций осушительных систем. – М.: Изд-во ВНИИГиМ, 1972. – С.23-27.
9. *Пыленок П.И.* Определение водообмена между грунтовыми водами и зоной аэрации в Мещерской низменности // *Вестник сельскохозяйственной науки.* – 1985. – № 1. – С.144-149.
10. *Олейник А.Я., Поляков В.Л.* Дренаж переувлажненных земель. – К.: Наукова думка, 1987. – 287 с.