

УДК 556.3:631.6

к.т.н. Телима С.В.,  
Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ

## ЩОДО ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ПРОЦЕСИ ВОДООБМІНУ В НАСИЧЕНО-НЕНАСИЧЕНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

*Запропоновано методу оцінки впливу на процеси водообміну в насичено-ненасиченому середовищі різних факторів, що враховують фільтраційні властивості ґрунтового потоку та кліматичні умови області фільтрації. Показано взаємовплив цих факторів на формування поверхні ґрунтових вод та її динаміку. Отримано наближені моделі волого переносу в зоні аерації з використанням синтетичних даних для гідрогеолого-меліоративних умов південних районів України.*

*Ключові слова: водний баланс, водообмін, фільтрація, вологоперенос, капілярне підняття, евапотранспірація, поверхня ґрунтових вод, водопровідність, міжрічковий масив*

В сучасних умовах, коли в Україні все гостріше відчувається дефіцит водних ресурсів, досить актуальною темою є оцінка взаємозв'язку між кліматом та водонасиченим середовищем в контексті водного балансу, що особливо важливо для південних районів країни.

Для оцінки вказаного взаємозв'язку використовуються різні критерії. При цьому, в першу чергу, оцінюється вплив на ґрунтові води та причини, що обумовлюють коливання рівнів ґрунтових вод (РГВ). Наприклад, при меліорації земель оцінюють добові коливання РГВ по відношенню до глибин їх залягання, а при довгостроковому прогнозуванні ресурсів підземних вод доцільно визначати рівень коливань РГВ на довгостроковий період і ці коливання оцінюються у відношенні до потужності водоносного горизонту, так як їх величина формує режим експлуатації цього горизонту.

Вплив кліматичних умов на ґрунтові води необхідно оцінювати по відношенню до усіх джерел живлення та витрат горизонту. При такому підході важливим є встановлення чітких границь досліджуваної області фільтрації, в межах якої необхідно проводити режимні спостереження за РГВ, досліджувати процеси вологопереносу в зоні аерації та взаємодію з підземними водами. Крім того, при оцінці впливу кліматичних умов необхідно враховувати також локальну топографію району, геолого-гідрогеологічні умови та геофільтраційні характеристики водовміщуючої товщі.

Локальні кліматичні умови впливають на режим ґрунтових вод у двох напрямках. Локальний стік впливає на коливання рівнів води в річковій мережі. Ці коливання впливають, в свою чергу, на форму поверхні ґрунтових вод. Клімат безпосередньо взаємозв'язаний з ґрунтовим потоком через його витрати на капілярне підняття. У тих випадках, коли ці джерела впливу істотно впливають на режим ґрунтових вод, їх необхідно враховувати при дослідженні системи клімат – ґрунтові води.

Як відомо, для оцінки динаміки ґрунтового потоку і капілярного підняття з поверхні ґрунтових вод використовується безліч методів. Стандартним і традиційним методом є метод водного балансу [1, 2, 4]. В деяких моделях враховується капілярне підняття, але в більшості з них витрати потоку визначаються з рівняння водного балансу без врахування вологопереносу в зоні аерації. Тому такі моделі є в більшій мірі емпіричними, ніж фізично обґрунтованими [1,2,4,6].

Для оцінки взаємовпливу кліматичних умов і ґрунтових вод розглянемо одновимірну нестационарну фільтрацію ґрунтових вод в обмеженому в плані водоносному горизонті, яка може бути описана наступним рівнянням :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + q(\theta_0, h(x, t)) = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

де  $K$  - коефіцієнт фільтрації у стані насичення,  $h$  - висота поверхні ґрунтових вод над заданою площиною,  $x$  - відстань від границі з заданим напором,  $\mu$  - коефіцієнт водовіддачі горизонту ґрунтових вод,  $q(\theta_0, h(x, t))$  - питомий приріст швидкості потоку у горизонті,  $\theta_0$  - середнє у часі і в просторі локальне значення вологи ( вологість ).

Запропонована модель базується на наступних припущеннях:

1. Переважаючою є горизонтальна фільтрація ґрунтових вод у виділеній області  $0 \leq x \leq L$  (рис.1) .
2. Водоносний горизонт вважається ізотропним  
Водовіддача приймається постійною у часі.

Для лінеаризованного випадку даної моделі в роботі [3] запропоновано аналітичний розв'язок стосовно РГВ в обмеженій в плані області фільтрації.

У якості граничних умов задаються рівні води в ріках, чи водосховищах, що мають прямий гідравлічний зв'язок з водоносним горизонтом ґрунтових вод:

$$h(0) = h_0(t) \quad (2)$$

$$h(L) = h_L(t) \quad (3)$$

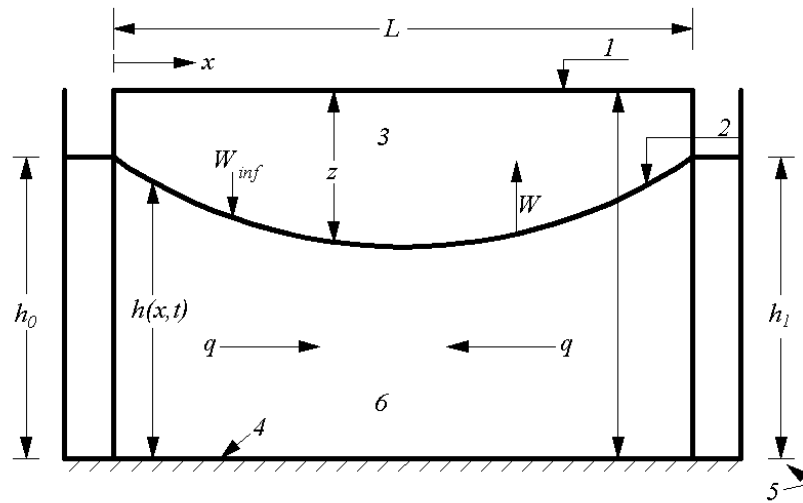


Рис.1. Схема профільної фільтрації ґрунтових вод в обмеженому водоносному горизонті  
 1 – поверхня землі, 2 – вільна поверхня ґрунтових вод, 3 – ненасичена зона,  
 4 – водотривка підшва горизонту, 5 – поверхня відліку рівнів ґрунтових вод,  
 6 – насичена зона.

Початкові умови задаються у вигляді початкового рівня ґрунтових вод по виділеному профілю:

$$h(x,0) = h_0(t) \quad (4)$$

Приймається також припущення, що водовіддача горизонту не залежить від глибини залягання ґрунтових вод,  $z$ .

Що стосується величини капілярного підняття,  $W$ , то для умов сухої поверхні землі та стаціонарного положення РГВ використовується наступна залежність відносно цієї величини [8,9]:

$$W = K \left[ 1 + 1,5(mc - 1)^{-1} \right] (\psi/z)^{mc}, \quad W/e_p < 1 \quad (5)$$

де  $m$  - індекс перерозподілу розмірів пор,  $C$  - індекс порового відокремлення,  $e_p$  - швидкість евапотранспірації,  $\psi$  - капілярний потенціал.

Як правило, капілярне підняття досягає стаціонарного стану протягом декількох діб або місяців, а для річних та сезонних коливань, коли ресурси горизонту значно змінюються, рекомендується застосовувати наступну залежність відносно величини капілярного підняття [8,9]:

$$\bar{W} = \left[ 1 + mc \left( \frac{\Delta z}{z} \right) \right] W_0, \quad \frac{\Delta z}{z} \leq 1 \quad (6)$$

де  $\bar{W}$  - сезонна (річна) швидкість капілярного підняття,  $W_0$  - середня довгострокова швидкість капілярного підняття,  $\Delta z$  - коливання РГВ у

порівнянні з довгостроковим середнім положенням РГВ,  $z$  - середня глибина до поверхні ґрунтових вод за довгостроковий період часу.

Введемо параметр оцінки впливу коливань РГВ на величину витрат ґрунтового потоку у наступному вигляді :

$$P = t_1 W / t_0 K \quad (7)$$

де  $t_0$  - середня тривалість сезону випадання опадів,  $t_1$  - число днів за рік, коли відбувається капілярне підняття.

Оскільки водообмін у насичено-ненасиченому середовищі залежить також і від величини вологості в зоні аерації, то дійсний вплив коливань РГВ на водний баланс у даному середовищі виражається як:

$$P(\theta_0, z) = t_1 W / t_0 K \theta_0^c \quad (8)$$

і може значно змінюватись в залежності від значень параметрів  $\theta_0$  і  $c$ . Максимальне значення величини впливу  $P$  визначається як:

$$P(\theta_0) = t_1 e_p / t_0 K \theta_0^c \quad (9)$$

Аналіз значень параметрів  $P(\theta_0, z)$  і  $P(\theta_0)$  дозволяє отримувати достатню інформацію про форму поверхні ґрунтових вод і впливу кліматичних умов на її форму.

Так, при  $P(\theta_0) \geq 1$  можливе зниження стаціонарної поверхні ґрунтових вод, що сформувалась за рахунок інфільтраційного живлення. Коли ж  $P(\theta_0) < 1$ , то це може свідчити про те, що швидкість капілярного підняття перевищує швидкість інфільтраційного живлення і поверхня ґрунтових вод піднімається вгору. У випадку, коли швидкість живлення і капілярного підняття рівні між собою, то

$$t_1 W = t_0 K \theta_0^c \quad (10)$$

або

$$P(\theta_0) = 1 \quad (11)$$

Підставляючи (5) в (10), отримуємо наступне співвідношення :

$$t_1 K B (\psi / z)^{m/c} = t_0 K \theta_0^c \quad (12)$$

яке можна переписати відносно параметру вологості як :

$$\theta_0 = (t_1 / t_0)^{1/c} B^{1/c} (\psi / z)^m \quad (13)$$

де

$$B = 1 + 1,5(mc - 1)^{-1} \quad (14)$$

Таким чином, при  $P(\theta_0, z)=1$  величина вологості виражається через параметри  $m$ ,  $c$  і  $\psi$ , де  $c=c(m)$ , які характеризують гідрофізичні властивості ґрунту, тобто, вологість є функцією фільтраційних властивостей ґрунту. Крім того, вона залежить і від кліматичних умов через параметри  $t_0$  і  $e_p$ , якщо  $P(\theta_0, z)=P(\theta_0)$  у припущенні фіксованої поверхні ґрунтових вод.

Рівняння (13) можна вважати універсальним, так як воно дозволяє визначати величину вологості для різних типів ґрунтів на основі параметрів насичено-ненасиченого середовища, які можна отримати експериментальним шляхом, чи в процесі проведення польових робіт.

Оскільки величина вологості залежить від швидкості капілярного підняття ( $\theta_0 = \theta_0(W)$ ), то максимальне значення  $\theta_0$  буде при  $W = e_p$ .

Припускаючи, що величина  $e_p$  є такою, що  $W = e_p$ ,  $P(\theta_0)=1$ , і  $t_0 = t_1$ , можна будувати графіки водного балансу для різних ґрунтів і різних кліматичних умов.

В таблиці 1 приведені характерні значення вищезазначених параметрів ґрунтів зони аерації півдня України, які можна використовувати для отримання рівнянь водного балансу [1,4,6,7].

Таблиця 1.

Основні характеристики ґрунтів зони аерації південних районів України

Тип ґрунту Параметр	Суглинок легкий, лесовидний	Суглинок середній, лесовидний	Суглинок важкий, лесовидний
$m$	2	0,667	0,286
$\psi$ (м)	-0,095	-0,43	-0,69
$K$ (м/добу)	0,58	0,45	0,43
$n_e$	0,452	0,45	0,43

На основі залежностей (13) і (14) отримано систему рівнянь відносно  $\theta_0$  для вказаних типів ґрунтів:

$$\theta_0 = 0.01z^{-2}, \quad (15)$$

$$\theta_0 = 0.22z^{-0.667},$$

$$\theta_0 = 0.49z^{-0.286}$$

Система рівнянь (15) дозволяє будувати графіки  $\theta_0 = f(z)$  при відповідних значеннях  $t_0$  і  $e_p$ . З цих графіків є можливим визначати закономірності формування поверхні ґрунтових вод під впливом тих, чи інших факторів (рис.2).

Вказані графіки дозволяють також визначати фактори формування області живлення горизонту або за рахунок кліматичних умов, або фільтраційних характеристик горизонту (коефіцієнту водопровідності). Якщо  $P(\theta_0) < 1$ , то можна вважати, що область живлення залежить в основному від величини

коефіцієнту фільтрації. Якщо ж  $P(\theta_0) > 1$ , то РГВ буде підніматись до тих пір, доки не буде виконуватись рівність  $P(\theta_0) = 1$ .

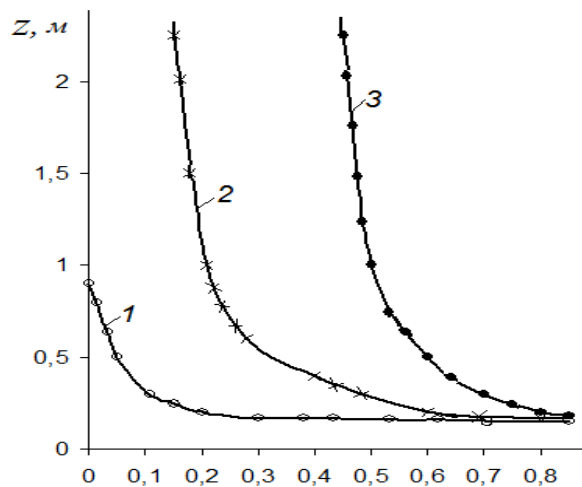


Рис.2. Графіки залежності величини вологості від глибини до ґрунтових вод для різних типів ґрунтів на масивах зрошення в південних районах України.  
1-суглинок легкий лесовидний; 11- суглинок середній лесовидний;  
111- суглинок важкий лесовидний.

В деяких випадках ці графіки можна використовувати для визначення  $\theta_0$ . Знаючи величини глибин залягання ґрунтових вод, випаровування та тривалості дощового сезону, при умові, що зниження, чи підйом РГВ контролюється в основному опадами і процесами випаровування і  $P(\theta_0) \gg 1$ , можна знайти відповідне значення  $\theta_0$  з відповідних графіків.

Для кожної системи клімат-ґрунт-вегетация є можливість побудувати також криві залежності величини швидкості капілярного підняття від глибини залягання ґрунтових вод за сезон і на довгостроковий період. Ці криві відображають чутливість водного балансу і швидкості водообміну до змін глибини залягання рівнів ґрунтових вод і дають інформацію щодо питання, коли можна знехтувати вологопереносом при складанні водного балансу, а коли швидкість надходження вологи на поверхню ґрунтових вод можна вважати рівномірно розподіленою у просторі. Крім того, виявляється можливим визначення максимальних глибин залягання ґрунтових вод, при яких буде мати місце стаціонарна депресійна поверхня або підйом РГВ, що сформувалися під впливом кліматичних умов.

Остаточний аналіз даних кривих дозволяє оцінювати зміни водного балансу через величину вологості в залежності від глибини до РГВ для умов усталеного режиму фільтрації. Вологість зменшується із зниженням РГВ, так як вона, забезпечуючи випаровування, не забезпечується вологою із поверхні ґрунтових вод, що знижується.

При аналізі вказаних кривих основним питанням є з'ясування того, коли можна припустити, що вологоперенос не буде залежати від глибини залягання ґрунтових вод. Для кліматичних умов півдня України можна вважати, що живлення ґрунтових вод буде постійним при  $z > 4...5$  м [1,5-7]. При цьому швидкість водообміну в зоні аерації зростає із збільшенням  $z$ , так як капілярне підняття зменшується швидше, ніж швидкість вологопереносу по мірі збільшення глибини до ґрунтових вод.

Таким чином, на основі даної моделі можна розраховувати глибини залягання РГВ та швидкість водообміну до поверхні ґрунтових вод і ці дані використовувати в подальших модельних дослідженнях при аналізі гідрогеолого-меліоративного стану земель зрошення та підтоплених територій.

Аналіз сумісної моделі балансу показує, що існує певна залежність форми і глибини стаціонарної депресійної поверхні ґрунтових вод від відстані між границями області фільтрації і від коефіцієнту фільтрації водоносного горизонту. Чим більша відстань між границями, тим поверхня ґрунтових вод знаходиться глибше від поверхні землі і має плоску форму.

Якщо розглядати міжрічковий масив, то від початкової плоскої вільної поверхні при  $t = 0$ , поверхня ґрунтових вод опускається спочатку по всій області з постійною швидкістю за виключенням ділянок, що близько розташовані до рік, де створюється градієнт потоку. Цей градієнт обумовлює фільтрацію з річок до центру водоносного горизонту. Як тільки цей потік досягає будь-якої внутрішньої точки горизонту, подальше зниження РГВ в цій зоні може бути обумовлене лише водовідбором з нього. В залежності від розмірів потоку і водопровідності горизонту зниження поверхні може зменшити випаровування до мінімуму раніше, ніж потік з річки досягне цієї частини водоносного горизонту, що залежить від різниці напорів.

Коли потік з обох річок досягає центру водоносного горизонту, то тоді вільна поверхня повністю викривляється. При цьому сформована воронка депресії буде меншою, ніж у випадку впливу на неї лише клімату за рахунок бокового живлення.

В цілому, можна зробити висновки, що на умови водообміну в насичено-ненасиченому середовищі впливає цілий комплекс факторів і в залежності від їх співвідношення буде формуватися вільна поверхня ґрунтових вод різної форми.

### Список використаної літератури

1. Дренажные системы в зоне орошения. - К., Урожай, 1987. – 192с.
2. Лебедев А.В. Оценка баланса подземных вод. - М., Недра, 1989. -174с.

3. Полубаринова- Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. - М.: Наука,1977. – 664 с.
4. Ситников А.Б. Вопросы миграции веществ в грунтах. - Киев, ИГН НАНУ, 2010. – 640 с.
5. Тельма С.В., Шех Сук Г.К. К методике численного решения задач регулирования водным режимом в зоне аэрации при двухслойном строении почвогрунта. Сб. научн.-техн. тр. „Меліорація і водне господарство”. - К., Урожай, 1994, вып. 81. – С. 109–108.
6. Шестаков В.М., Пашковский И.С., Соيفер А.М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. - М., Недра, 1982. - 204 с.
7. Яцик М.В., Ковальчук В.П., Коломієць С.С. Принципи створення бази даних для інформаційного забезпечення технологій регулювання водного режиму ґрунтів. Міжвід. тем. наук. зб. „Меліорація і водне господарство”, 2004, вип. 9. – С. 154–163.
8. Gardner H.R., Gardner W.R. Relation of water application to evaporation and Storage of Soil water. Soil. Sci. Soc. Am. Proc., 1969, vol. 33. p. 192–196.
9. Eagleson P.S. Climate, soil and vegetation. 3. A simplified model of soil moisture movement in liquid phase. Water Resour.Res., vol.14, no.5,1978. – p. 722-730.

### АННОТАЦИЯ

Предложено методику оценки влияния на процессы водообмена в насыщенно-ненасыщенной среде различных факторов, которые учитывают фильтрационные свойства грунтового потока и климатические условия области фильтрации. Показано взаимовлияние этих факторов на формирование поверхности грунтовых вод и на ее динамику. Получены приближенные модели влагопереноса в зоне аэрации с использованием синтетических данных для гидрогеолого-мелиоративных условий южных районов Украины.

Ключевые слова: водный баланс, водообмен, фильтрация, влагоперенос, капиллярное поднятие, эвапотранспирация, поверхность грунтовых вод, водопроницаемость, междуречный массив.

### RESUME

The methodic of the valuation of the influence on the waterexchange processes in the saturated-unsaturated media the different factors that to take into account the flow properties of the ground water and the climate conditions of the flow domain is proposed. The interaction of these factors on the ground water surface and its dynamics is showed. The approximate models of the moisture transfer in aeration zone with using of the synthetic data for the hydrogeology –reclamation conditions of the southern regions of Ukraine are received.

Key words: water balance, waterexchange, filtration, moisture transfer, capillary lifting, evapotranspiration, ground water surface, watertransmissivity, among rivers territory.