УДК 631.31.06

Д. Катюха
Таврійська державна агротехнічна академія

ПОБУДОВА ТА АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ ПРИ КРАПЛИННОМУ ЗРОШЕННІ*

Побудовано динамічну модель вологості ґрунту в умовах краплинного зрошення, що відображає динаміку зміни вологовмісту ґрунту як в процесі зрошення, так і після його відключення.

Умовні позначення

Q – витрата води однією крапельницею;
q – питома витрата води по довжині крапельної трубки;
l_k – відстань між крапельницями;
V_y, V_z – складові швидкості розповсюдження вологи (горизонтальна та вертикальна);
$V_г$, $V_в$ - швидкості розповсюдження вологи (горизонтальна та вертикальна);
$m_в$ – маса води, поданої одноразово через зрошувальну трубку;
V_0 – об'єм умовного еліптичного циліндра;
$\rho_в$ – щільність води;
$\rho_д$ – дійсна щільність ґрунту;
ET_0 – випаровування вологи з поверхневого шару ґрунту (евапотранспірація);
z – товщина шару ґрунту;
ET_z – втрата вологи шаром z;
α - експериментальний коефіцієнт;
k_0, k_z – зміна об'ємної вологості за одиницю часу на поверхні ґрунту і на глибині z відповідно;
t_n – час поливання.

При вирішенні завдань обробки міжрядь із краплинним зрошенням, яке виконується укладанням зрошувальної трубки по центру міжряддя, зіштовхуємося з тим фактом, що вологість ґрунту не однакова по всій ширині міжряддя, а отже неоднаковий і кут тертя ґрунту по сталі. Враховуючи відомі закономірності обґрунтування кута розхилу культиваторних лап [1], можна зробити висновок, що найбільш раціональною формою леза є не прямолінійна, а якась криволінійна. Для обґрунтування форми леза необхідно побудувати математичну модель, що давала б уявлення про величину вологості ґрунту в будь-якій точці оброблюваного шару як у процесі зрошення, так і через певний час після його припинення.

У теперішній час для розрахунку вологості ґрунту використовується цілий ряд методів. Всі вони зводяться до визначення сумарного водоспоживання із площі зрошуваного поля залежно від фізіологічних властивостей рослин, метеорологічних умов і рівня агротехніки. Однак всі ці методи придатні для визначення лише усередненої вологості ґрунту на полі.

Метою статті є побудова динамічної моделі вологості ґрунту, що враховує її неоднорідність за шириною міжрядь польових культур, вирощуваних за технологіями з використанням краплинного зрошення.

Для побудови математичної моделі водного балансу для будь-якої точки оброблюваного шару, на наш погляд, необхідно розглянути два протилежних процеси: насичення ґрунту вологою внаслідок зрошення й збитки вологи внаслідок випаровування.

Розглянемо перший процес. Нехай точка О - положення крапельниці зрошувача з витратою води Q, л/с (рис. 1). Для того, щоб перейти до більш простої плоскої схеми процесу, введемо припущення, відповідно до якого вода подається не в окремі крапельниці, розташовані на певній відстані одна від одної, а рівномірно по всій довжині зрошувальної трубки з питомою витратою q, л/(с·м) (рис. 2):

$$q = \frac{Q}{l_k}, \qquad (1)$$

* Робота виконана під керівництвом к.т.н. Рогача Ю.П.

де l_k – відстань між зрошувальними крапельницями.

Відомо, що швидкість поширення вологи в ґрунті по капілярах у горизонтальному й вертикальному напрямках неоднакова і залежить від властивостей та стану ґрунту. Розходження у швидкості розповсюдження зумовлені дією сили ваги. Внаслідок цього, очевидно, що фронт поширення вологи буде мати форму еліпса, в центрі якого перебуває зрошувальна трубка. Форму еліпса буде також мати крива, проведена через кінці векторів швидкостей розповсюдження вологи.

Рівняння цієї кривої запишеться у вигляді

$$\frac{V_y^2}{V_г^2}+\frac{V_z^2}{V_в^2}=1, \qquad (2)$$

де V_y, V_z – відповідно горизонтальна й вертикальна складові швидкості розповсюдження вологи від зрошувальної трубки (точка О) до точки А;

$V_г$, $V_в$ – відповідно швидкості розповсюдження вологи в горизонтальному й вертикальному напрямках.

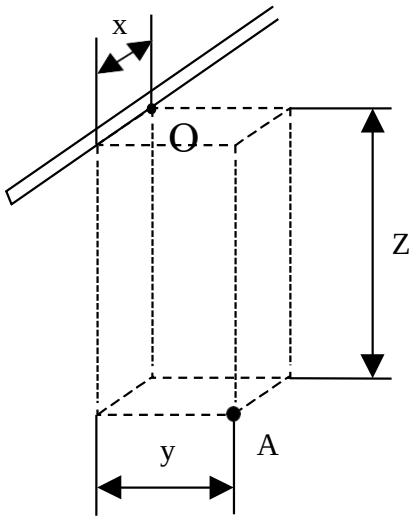

Рисунок 1 - Положення довільної точки А відносно крапельниці зрошувача

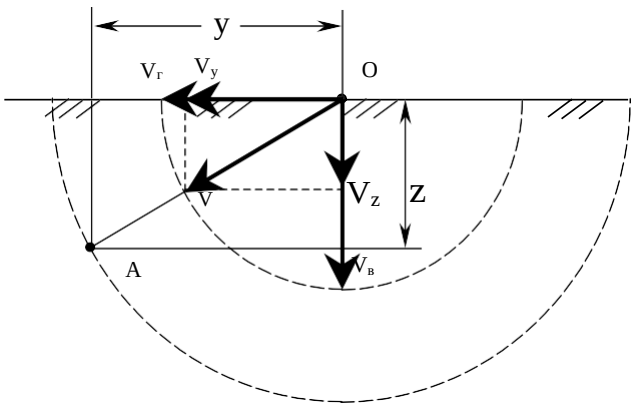

Рисунок 2 - Розрахункова схема до визначення швидкості розповсюдження вологи в ґрунті

Через якийсь час t волога займе площу F, що дорівнює половині площі еліпса:

$$F=\frac{1}{2}\pi\left(V_г t\right)\left(V_в t\right), \text{ або } F=\frac{1}{2}\pi V_г V_в t^2. \qquad (3)$$

Введемо ще одне припущення: якщо одноразово подати через зрошувальну трубку деяку кількість води, то після закінчення часу t ця вода буде рівномірно розподілена усередині еліптичного циліндра з площею поперечного перерізу, що визначено залежністю (3).

Знайдемо об'ємну вологість ґрунту усередині цього циліндра, що визначається як

$$W=\frac{m_в}{V_0}, \qquad (4)$$

де $m_в$ – маса води, поданої одноразово через зрошувальну трубку;

V_0 – об’єм еліптичного циліндра.

Таким чином, для розглянутого процесу об'ємна вологість є функцією часу:

$$W(t)=\frac{2m_в}{\pi l_к V_г V_в t^2}. \qquad (5)$$

Розглянемо тепер реальний процес, коли вода подається не порційно, а безупинно з питомою витратою q. Очевидно, що точки А волога досягне через якийсь час t_0 після початку подачі. Після цього протягом деякого короткого терміну часу dt у точці А буде перебувати тільки волога, що надійшла з зрошувальної трубки також

протягом dt після початку подачі:

$$W(t)=\frac{2q\rho_в dt}{\pi V_г V_в t_0^2}, \tag{6}$$

де $\rho_в$ – щільність води.

Для того, щоб знайти значення об'ємної вологості в будь-який момент часу, більший t_0, проінтегруємо вираз (6):

$$W(t)=\frac{2q\rho_в}{\pi V_г V_в}\int_{t_0}^{t}\frac{dt}{t^2}, \quad t>t_0. \tag{7}$$

Після інтегрування одержимо

$$W_0(t)=\frac{2q\rho_в}{\pi V_г V_в}\left(\frac{1}{t_0}-\frac{1}{t}\right), \quad t>t_0. \tag{8}$$

Помноживши ліву і праву частини виразу (2) на t_0^2, одержимо:

$$\frac{y^2}{V_г^2}+\frac{z^2}{V_в^2}=t^2. \tag{9}$$

Звідки

$$W(t)=\frac{2q\rho_в}{\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{y^2V_в^2+z^2V_г^2}}-\frac{1}{V_г V_в t}\right). \tag{10}$$

Враховуючи, що абсолютна вологість ґрунту

$$W_a=\frac{W}{\rho_д}, \tag{11}$$

де $\rho_д$ – дійсна щільність ґрунту,
то перейдемо до абсолютної вологості:

$$W_a(t)=\frac{2q\rho_в}{\pi\rho_д}\left(\frac{1}{\sqrt{y^2V_в^2+z^2V_г^2}}-\frac{1}{V_г V_в t}\right). \tag{12}$$

Розглянемо тепер процес зміни вологості ґрунту, викликаного випаровуванням. Необхідно виділити два випадки: коли відсутнє зовнішнє підведення води (зрошення вимкнене) або воно є (зрошення ввімкнене).

Розглянемо випадок, коли зрошення ввімкнене, тобто є постійне зовнішнє підведення вологи. Очевидно, що в цьому випадку при сталому режимі вологість ґрунту не буде змінюватися з часом, а буде варіювати залежно від глибини ґрунтового горизонту.

За якийсь час Δt з поверхні ґрунту площею S випарується волога масою

$$\Delta m = ET_0\Delta t S\rho_в, \tag{13}$$

де ET_0 – випаровування вологи з поверхневого шару ґрунту (евапотранспірація) [2].

За цей же час до поверхні надійде волога, що перебуває в деякому поверхневому шарі Δz. Товщина цього шару буде залежати від швидкості поширення вологи вертикально вгору $V_{вв}$:

$$\Delta z = V_{вв}\Delta t. \tag{14}$$

При цьому зміна об'ємної вологості поверхневого шару визначиться як

$$\Delta W_0=\frac{\Delta m}{V}, \tag{15}$$

де V - об'єм ґрунту, з якого надійде волога до поверхні за розглянутий проміжок часу.

Звідси

$$\Delta W_0 = \frac{ET_0 \rho_в}{V_{вв}}. \tag{16}$$

За аналогією з наведеним виразом для будь-якого шару маємо

$$\Delta W_z = \frac{ET_z \rho_в}{V_{вв}}, \tag{17}$$

де ET_z – втрата вологи шаром z, м^3/с.

Відомо [3], що зміна об'ємної вологості в одиницю часу на глибині z визначається як:

$$k_z = k_0 e^{-\alpha z}, \tag{18}$$

де α - експериментальний коефіцієнт;

k_0, k_z – зміна об'ємної вологості за одиницю часу на поверхні ґрунту і на глибині z відповідно.

Тоді ми можемо знайти загальну втрату вологи шаром ґрунту глибиною z

$$\int_0^z k_z = \int_0^z k_0 e^{-\alpha z}. \tag{19}$$

При досить великому шарі z підведенням вологи з нижніх шарів можна знехтувати. У цьому випадку загальна втрата вологи, тобто ліва частина рівняння (15) буде виражати не що інше, як випарування вологи:

$$\rho_в ET_0 = \frac{k_0}{\alpha}\left(1 - e^{-\alpha z}\right). \tag{20}$$

При досить великому z

$$k_0 = \rho_в ET_0 \alpha. \tag{21}$$

З виразів (18) і (21) маємо

$$ET_z = ET_0 e^{-\alpha z}. \tag{22}$$

Звідси

$$\Delta W_z = \frac{ET_0 \rho_в e^{-\alpha z}}{V_{вв}}. \tag{23}$$

Або для абсолютної вологості

$$\Delta W_{az} = \frac{\rho_в}{\rho_д} \frac{ET_0 e^{-\alpha z}}{V_{вв}}. \tag{24}$$

Для розглянутого завдання краплинного зрошення підставимо замість $W_н$ її значення (12)

$$W_a = \frac{\rho_в}{\rho_д}\left(\frac{2q}{\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{y^2V_в^2 + z^2V_г^2}} - \frac{1}{V_г V_в t}\right) - \frac{ET_0 e^{-\alpha z}}{V_{вв}}\right). \tag{25}$$

Аналізуючи отриманий вираз, робимо висновок, що із часом абсолютна вологість росте, асимптотично наближаючись до деякого сталого максимуму (рис.3):

$$W_a = \frac{\rho_в}{\rho_д}\left(\frac{2q}{\pi\sqrt{y^2V_в^2 + z^2V_г^2}} - \frac{ET_0 e^{-\alpha z}}{V_{вв}}\right). \tag{26}$$

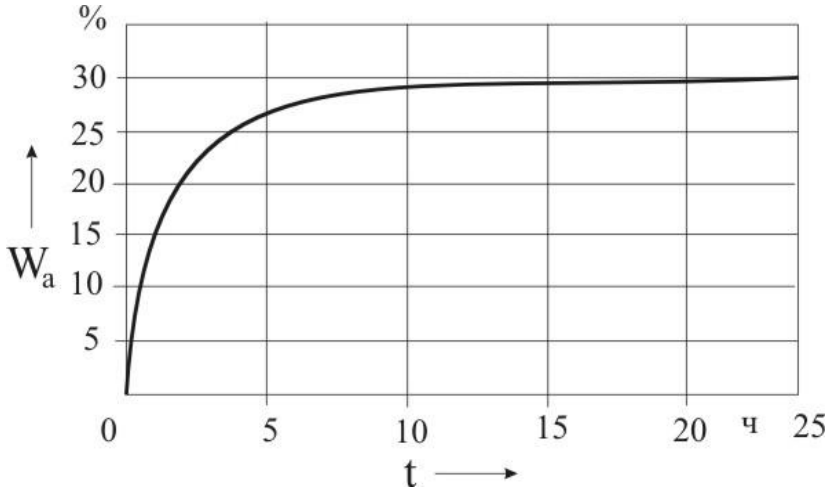

Рисунок 3 - Зміна вологості ґрунту в залежності від часу зрошення (z=10см, y=20 см, q=1,5 л/год)

Таким чином, вираз (26) дозволяє розрахувати абсолютну вологість для будь-якого моменту часу поливання.

Розглянемо тепер випадок, коли краплинне зрошення вимкнене. Припустимо, що в деякий початковий момент часу поверхневий шар мав об'ємну вологість W_0. Нехай цей шар є ізольованим, тобто він не одержує вологу від нижніх шарів. Тоді і часом t його вологість буде змінюватися відповідно до рівняння:

$$W = W_0 - k_0 t\,, \tag{27}$$

де k_0 – втрата вологи поверхневим шаром, кг/(м^3·с).

Ці міркування вірні не тільки для поверхневого шару, але й для будь-якого іншого.

Таким чином, з огляду на вираз (21), зміна об'ємної вологості для шару z запишеться залежністю:

$$W = W_0 - \rho_в E T_0 \alpha e^{-\alpha z} t\,, \tag{28}$$

або абсолютної вологості

$$W_a = W_{ан} - \frac{\rho_в}{\rho_д} E T_0 \alpha e^{-\alpha z} t\,. \tag{29}$$

Для розглянутого завдання краплинного зрошення підставимо замість $W_{ан}$ її значення (12)

$$W_a = \frac{\rho_в}{\rho_д}\left(\frac{2q}{\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{y^2V_в^2 + z^2V_г^2}} - \frac{1}{VVt_{гвп}}\right) - ET_0\alpha e^{-\alpha z} t\right), \tag{30}$$

де t_n – час поливання.

Висновки. Рівняння (30) являє собою рівняння водного балансу для будь-якої точки ґрунту, що перебуває на заданій глибині і віддаленої на певну відстань від зрошувальної трубки. Це рівняння дозволяє розрахувати абсолютну вологість для будь-якого моменту часу після припинення поливання.

Запропонована модель може застосовуватися для планування поливних режимів сільськогосподарських культур, а також у якості вихідних даних для проектування ґрунтообробних знарядь.

The dynamic model of soil humidity under conditions of drop irrigation, reflecting the dynamics of soil humidity change is constructed both under irrigation, and after its switching-off.

Література

1. Василенко П.М., Бабий П.Т. Культиваторы. Теория, конструкция, расчет. Изд-во Украинской академии с.-х. наук. - К., 1961
2. Allen R, Pereira L., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56, Rome, 1998
3. Мелиорация и водное хозяйство. Справочник. - М.: Агропромиздат, 1984, т.6. Орошение. Под ред. Шумакова, 1980 – 411 с.
4. Катюха Д.А., Рогач Ю.П., Просвирнин В.И. Оперативное регулирование влажности почвы при выращивании овощных культур. //Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.24. – 2004. – С.75-79.

Одержано 28.11.2005 р.