

*А. Штірбу, д-р філософії,
В. Паларієв, здобувач третього (освітньо- наукового)
рівня вищої освіти (доктор філософії)*

Національний науковий центр
«Інститут виноградарства і виноробства імені В.Є. Таїрова»

e-mail: stirbu.a@gmail.com

ІНТЕГРОВАНІЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ ВИНОГРАДУ НА ОСНОВІ ЕВАПОТРАНСPIРАЦІЇ ТА ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

В статті викладені методологічні підходи до розроблення моделі визначення строків і норм поливу винограду за умов краплинного зрошення, який базується на синтезі показників евапотранспірації та вологості ґрунту, з метою раціоналізації використання водних ресурсів, оптимізації водного балансу агрофітоценозу та підвищення ефективності зрошувального режиму в умовах Південного Степу України. Показано, що інтегрований метод визначення режиму краплинного зрошення винограду за даними поточних значень евапотранспірації характеризується рядом істотних переваг: високою точністю строків поливу при мінімізації перевитрати води; об'єктивно враховує кліматичні умови – температуру, вітер, вологість повітря, надходження сонячної радіації; оптимізує використання водних ресурсів у системах дефіцитного зрошення.

Ключові слова: виноград, зрошення, евапотранспірація, вологість ґрунту.

Вступ. Зрошення винограду на Півдні України є вкрай актуальним у зв'язку з посиленням проявів кліматичних змін, зростанням частоти та тривалості літніх посух і дефіцитом природних опадів. Обмежене вологозабезпечення у критичні фази росту та розвитку рослин призводить до зниження врожайності та погіршення якості ягід. Використання раціональних систем зрошення дозволяє стабілізувати водний баланс ґрунту, підвищити стійкість виноградних насаджень до стресових умов та забезпечити сталість продуктивності виноградарства в регіоні [9; 10].

На Півдні України водні ресурси для зрошення є обмеженими, що зумовлено як кліматичними факторами, так і конкуренцією між аграрним, промисловим та комунальним водокористуванням [7]. У цих умовах особливого значення набуває впровадження раціональних стратегій зрошення, зокрема використання краплинного поливу, регульованого дефіцитного зрошення та оптимізації поливних норм відповідно до фаз розвитку винограду. Такі підходи дозволяють зменшити непродуктивні втрати води, підвищити водокористувальну ефективність та забезпечити стабільність врожаю за мінімальних витрат ресурсу [3].

Мета дослідження – розробити та науково обґрунтувати інтегрований метод визначення строків і норм поливу винограду за умов краплинного зрошення, який базується на синтезі показників евапотранспірації та вологості ґрунту, з метою раціоналізації використання водних ресурсів, оптимізації водного балансу агрофітоценозу та підвищення ефективності зрошувального режиму в умовах Південного Степу України.

Матеріал та методи. Інтеграція поточних значень потенційної евапотранспірації (ET_0) у визначення строків поливу — це сучасний підхід до динамічного управління зрошенням, який дозволяє максимально точно реагувати на фактичні погодні умови й водний стан агрофітоценозу. У виноградарстві та інших багаторічних культурах він має особливу цінність, оскільки дозволяє оптимізувати об'єм і час внесення води.

Полив виконується не за календарем, а при досягненні певного кумулятивного значення ET_0 , яке відповідає втратам вологи з кореневмісного шару, що перевищують

допустиме зниження запасів продуктивної вологи ($\Delta W_{\text{доп}}$). Призначення чергового поливу за даними щоденного накопичення значень ET_0 здійснюється за таким алгоритмом:

$$\sum ET_0 \geq \Delta W_{\text{доп}} \Rightarrow \text{пора поливу}$$

Показник ET_0 відповідає потенційному випаровуванню води з еталонної поверхні – з ділянки зеленої, коротко підстриженої трави, яка активно росте і не відчуває дефіциту води. Дані ET_0 залежать виключно від погодних факторів, таких як сонячна радіація, температура повітря, вологість і швидкість вітру.

Для визначення фактичної потреби рослин у воді для іригації використовується показник ET_c , який характеризує фактичну кількість води, яку споживає конкретна сільськогосподарська культура на певному етапі свого розвитку. Дані ET_c , як правило, дає розрахунок за формулою:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

де: K_c — коефіцієнт культури.

Врахування опадів та $\Delta W_{\text{доп}}$ відноситься до завершального етапу призначення чергового поливу за алгоритмом:

$$\sum (ET_c - P) \geq \Delta W_{\text{доп}} \Rightarrow \text{пора поливу}$$

де: P — ефективні опади;

Розрахунок поливної норми на основі ET_c базується на відшкодуванні дефіциту води та є основою балансового підходу до планування зрошення у сучасному агровиробництві. Поливна норма на основі ET_c визначається виходячи потреби внесення води для компенсації водовтрат, щоб забезпечити нормальний ріст і розвиток сільськогосподарських культур.

У зазначеному вигляді алгоритм призначення чергового поливу та розрахунку поливної норми може застосовуватись на полях з іригаційними системами, оснований на дощуванні. За умов часткового зволоження ґрунтового профілю при краплинному зрошенні виникає необхідність коригування режиму поливу на основі формалізованого математичного підходу. Такий підхід передбачає постановку та розв'язання прикладної задачі, що включає низку етапів, критичною умовою яких є експериментальна верифікація працездатності рішення у виробничих умовах з урахуванням наступних змінних параметрів:

Культура: Виноград технічних сортів (на базі ТОВ «ФРУМУШИКА-НОВА» Бородінської селищної ТГ Болградського р-ну Одеської обл.);

Кліматичні умови: Південний степ (семіарідна зона);

Ґрунт: Чорнозем звичайний важкосуглинковий (вміст фізичної глини 45-54%, мулу – 14-27%);

Тип зрошення: Краплинне, з продуктивністю емітера – 0,9 л/год;

Щільність розміщення емітерів: 5 291 шт./га, що відповідає кількості кущів на гектарі.

Результати досліджень. *Етап 1:* облік щоденного накопичення значень ET_0 від початку вегетації. Дані можна визначати за допомогою лізиметрів, радіаційних балансометрів, саплоуметрів, супутникових систем дистанційного зондування тощо. У цьому дослідженні використаний розрахунковий метод на підставі даних автоматичної метеостанції Інспектор Метео™ (IT-Lynx™), яка укомплектована датчиками обліку температури повітря, опадів, напрямку та швидкості вітру, відносної вологості повітря, атмосферного тиску, температури та вологості ґрунту.

Метеорологічні дані інтегрували у калькулятор для розрахунку значень ET_0 за стандартами FAO (формула Пенмана-Монтейна). Зокрема, на підставі вимірюваних даних: максимальної та мінімальної температури (°C), відносної вологості повітря (%) за добу та їх середньодобові значення. Також вводили дані швидкості вітру (м/с) та надходження енергії сонячного світла на горизонтальну поверхню (МДж/м²×день).

Етап 2: коригування на фактичну евапотранспірацію культури (ET_c). Як було зазначено вище, при краплинному поливі тільки частина поверхні безпосередньо

зволожується, тому випаровування ґрунту зменшується пропорційно зволоженій частці, а транспірація при зв'язку коренів із змоченою зоною залишається близькою до повної [1]. Рішення полягає в розділенні K_c на два окремі коефіцієнти: транспірації сільськогосподарської культури (K_{cb}) і випаровування з ґрунту (K_e):

$$ET_c = ET_o \cdot (K_{cb} + f_w \cdot K_e)$$

де: K_{cb} — транспірація культури (базова);
 f_w — частка змоченої поверхні ґрунту;
 K_e — випаровування ґрунтової вологи;

Коефіцієнт K_{cb} характеризує транспірацію рослини за умов відсутності обмежень у вологості ґрунту та при мінімальному випаровуванні з поверхні ґрунту. Для винограду K_{cb} приймається на рівні 0,15 – на початку вегетації; 0,65 – при максимальному розвитку листового покриття; 0,40 – у період досягання ягід. Тривалість періодів, до яких застосовується той чи інший коефіцієнт, на середніх широтах дорівнює 30 днів від початку вегетації, 60 днів інтенсивного росту, 40 днів максимального розвитку, 80 днів завершення вегетації.

Показник f_w визначає частку площі ґрунту, що зволожується під час опадів або поливу. Якщо джерело зволоження – опади, то випаровування від поверхні ґрунту розглядається як 100% змоченої поверхні ($f_w \approx 1$). При крапельному поливі з продуктивністю емітерів 0,9 л/год на поверхні змочується близько 0,19 м² площі або 1 038 м² на гектарі ($f_w \approx 0,1$) при кількості 5 291 емітерів/га.

Коефіцієнт K_e характеризує частку ET_o , що припадає на випаровування вологи з поверхні ґрунту. У шпалерно-рядових насадженнях міжряддя часто залишаються відкритими, тому K_e сильно варіює залежно від фази розвитку та агротехніки. Орієнтовні рівні K_e на винограді: 0,5-0,7 – на початку вегетації, коли листові маса покриває <20% площі; 0,3-0,5 – у період інтенсивного росту пагонів (20-40% покриття листовою поверхнею); 0,1-0,2 – при максимальному розвитку листової поверхні (60-70% покриття ґрунту); 0,2-0,4 – після збору врожаю (до листопаду).

Однак, коефіцієнт K_e завжди тимчасовий: його значення високі одразу після зволоження, але протягом 2–3 днів швидко зменшуються до нуля на сухому ґрунті. Утримання ґрунту під мульчею або в стані чорного пару з рихленням після опадів чи зрошення можуть різко знизити K_e в будь-який період. При краплинному зрошенні K_e розраховується на частку змоченої площі (f_w).

З урахуванням посушливого регіону та обмежених ресурсів води, у досліді використана стратегія дефіцитного зрошення – подачі поливної води протягом вегетації винограду за зниження ET_c до рівня 50%. Доцільність цієї стратегії на винограді має наукове обґрунтування, особливо якщо мета — покращення якості ягід і економія води. Результати сучасних досліджень підтверджують, що 50% ET_c — це допустима стратегія помірному стресу для технічних сортів винограду, яка полягає в тому, щоб свідомо подавати менше води, ніж потреба за ET_c . Наприклад, при 50% ET_c рослині подається лише половина потенційної потреби, що дозволяє зменшити витрати води, контролювати вегетативний ріст, покращити концентрацію цукрів і фенолів у ягодах [8; 4].

Етап 3: визначення параметрів зволоження ґрунту при краплинному зрошенні. На важкосуглинковому ґрунті формується «цибулиноподібний» контур зволоження: вузьке горло біля поверхні через випаровування та нижчу тривалість зволоження; розширення у середніх горизонтах через поєднання низької вертикальної фільтрації та високого капілярного переносення; конусоподібне звуження до глибини через гравітаційне витягування (рис. 1).

Польова оцінка середніх арифметичних площ дозволяє розрахувати об'єм ґрунту, що зволожується у зоні максимального розвитку кореневої системи (для винограду до глибини 1 м):

$$\bar{A} = \frac{A_t + A_m + A_b}{3} \approx \frac{0,1257 + 0,4418 + 0,1257}{3} \approx 0,2310 \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ м} = 0,231 \text{ м}^3$$

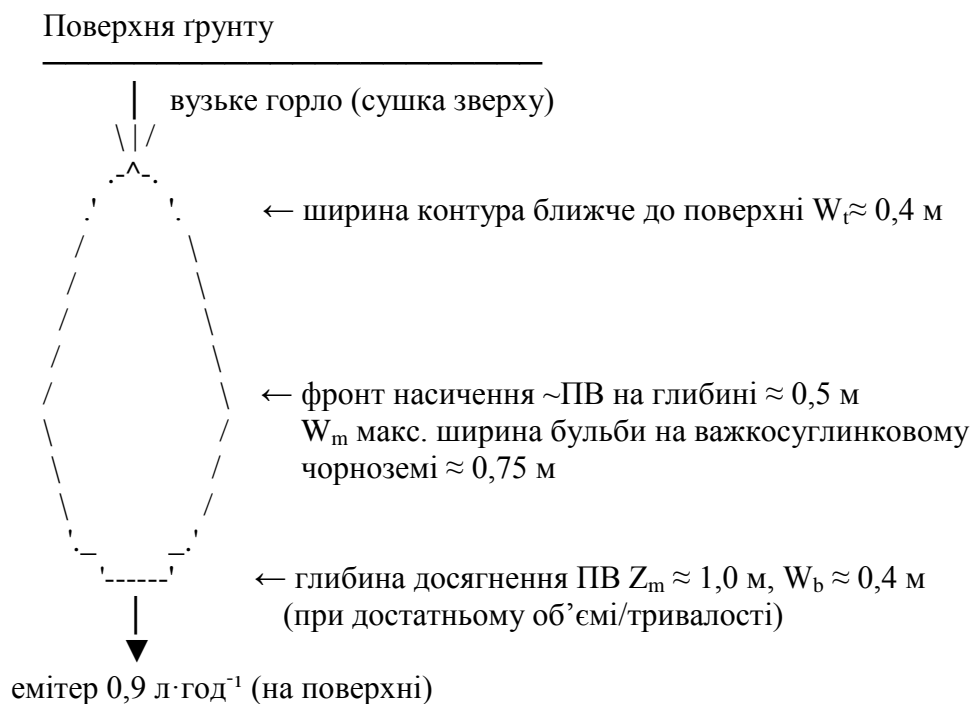


Рис.1 Схема поперечного розтину контуру зволоження
(не в масштабі)

Для ефективного управління зрошенням необхідно враховувати водні властивості ґрунту – польову вологоємність (FC), тобто максимальну кількість води, яку ґрунт може утримувати у стані повного насичення, і вологість в'янення (PWP), при якій рослини вже не можуть поглинати воду і починають в'янути. Різниця між FC та PWP показує запас доступної води (TAW), який вимірюється в міліметрах води у певному шарі ґрунту (наприклад у метрі). Значення цих показників для важкосуглинкового ґрунту представлені у табл. 1.

Таблиця 1

**Водно-фізичні властивості чорнозему звичайного важкосуглинкового
(за даними лабораторного аналізу)**

Глибина відбору, см	Об'ємна маса ґрунту, г/см ³	Вміст води (м ³ /м ³) при:			TAW 1000($\theta_{FC} - \theta_{WP}$), мм/м
		насиченні (θ_{sat})	польової вологоємності (θ_{FC})	вологості в'янення (θ_{WP})	
0-50	1,19	0,54	0,31	0,14	170
50-100	1,34	0,49	0,30	0,16	140
0-100	1,26	0,51	0,30	0,15	150

При частковому зволоженні ґрунту TAW зручніше вимірювати в літрах води у об'ємі зволоження. Наприклад, якщо в умовах дослідження до глибини 1 м зволожується об'єм $0,231 \text{ м}^3$ ґрунту, то TAW дорівнюватиме $0,035 \text{ м}^3$ або 35 літри води, виходячи з рівняння:

$$TAW = 0,231 \times (0,30 - 0,15)$$

Знаючи цей рівень та фактичну вологість ґрунту (ASW) можна точно розрахувати об'єм подачі поливної води, щоб уникнути таких ефектів, як поверхневий стік та

просочування у підгрунтя. ASW визначається за даними вагової вологості і показує, скільки саме води доступно рослинам у певному шарі ґрунту в даний момент.

Наприклад, за даними лабораторного аналізу на 08.04.2024 р. (на початок вегетації винограду) середня вагова вологість ґрунту у шарі 0-100 см була на рівні 22,87%. Щоб розрахувати запаси води (у $\text{м}^3/\text{м}^3$), % потрібно перевести у частку від одиниці, тобто поділити на 100, та помножити на об'ємну масу ґрунту. Так, на об'єм зволоження $0,231 \text{ м}^3$ ґрунту ASW дорівнюватиме $0,032 \text{ м}^3$ або 32 літрів води, виходячи з рівняння:

$$ASW = (0,2287 \times 1,26 - 0,15) \times 0,231$$

Етап 4: встановлення допустимого порогу водного дефіциту (ΔW). Цей показник відповідає зниженню вологості ґрунту або водозабезпечення рослини до критичного рівня, після перебігу якого зменшується продуктивність рослин, погіршується якість врожаю або виникають незворотні фізіолого-біохімічні порушення.

За даними [2; 5], кількість легкодоступної для рослин води (RAW або $p.Sa$) залежать в основному від глибини вкорінення сільськогосподарських культур. Для винограду діапазон максимально ефективної глибини вкорінення дорівнює 1-2 м, при цьому частка виснаження ґрунтової вологи (p) за відсутності водного стресу – 0,45 або 45% від запасу доступної вологи.

Показник RAW – це частина $TAW \times p$, яку рослина може використати без проявів водного стресу, де p – коефіцієнт легкодоступної вологи. Коли запас доступної вологи знижується нижче рівня RAW, рослина починає відчувати водний стрес, що може впливати на фізіологічні процеси та врожайність. Показник ΔW відповідає нижній межі легкодоступної вологи – тобто обсягу, який можна втратити до початку стресу. У прикладі з об'ємом зони зволоження $0,231 \text{ м}^3$, це становить:

$$\Delta W = TAW - RAW = 0,035 - 0,015 = 0,020 \text{ м}^3 \approx 20 \text{ л}$$

Етап 5: інтегрування даних розрахунків у модель для практичного застосування. На практиці описану модель можна реалізувати автоматично за допомогою систем дистанційного моніторингу (AgriMet, iMetos, CropWat, OpenET тощо), які в реальному часі накопичують ET_o та попереджають про потребу поливу [6]. У цьому дослідженні використано напівавтоматичний принцип за допомогою табличного редактора MS Excel.

Структура шаблону таблиці Excel для визначення строків поливу винограду на основі щоденного накопиченого дефіциту наступна:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Дата	ET_o (мм)	K_{cb}	f_w	K_e	ET_c (мм)	Опади / Полив (мм)	ASW (л/об'єм зволож.)	Полив потрібен?
2	8.04.2024	3,4	0,15			0,5		32,0	Ні
3	9.04.2024	3,7	0,15			0,6		31,7	Ні
...									
94	09.07.2024	7,3	0,65			4,7		21,9	Ні
ASW \geq ΔW \Rightarrow полив відкладається									
95	10.07.2024	7,5	0,65			4,9		19,4	Так
ASW \leq ΔW \Rightarrow призначається полив									
96	11.07.2024	7,1	0,65	0,1	0,3	4,7	10,8	27,9	Ні

Пояснення до стовпців:

- ET_o (мм): добова евапотранспірація;
- K_{cb} : коефіцієнт культури;
- f_w : частка змоченої поверхні ґрунту;
- K_e : коефіцієнт випаровування ґрунтової вологи;
- $ET_c = ET_o \times (K_{cb} + f_w \times K_e)$: фактична евапотранспірація культури;
- Опали / Полив (мм): добові опади та або полив;
- ASW (л/об'єм зволоження): фактична вологість ґрунту;
- Полив потрібен?: «Так», якщо $ASW \leq \Delta W$.

Для автоматичного розрахунку у комірках таблиці MS Excel вводяться наступні формули (приклад для третього рядка «09.04.2024»):

- ET_c : =B3*(C3+D3*E3)
- ASW: =H2-F3*0,5+G3
- Полив потрібен?: =IF(20>=H3;"Так";"Hi")

де: H3 — фактична вологість, л/об'єм зволоження;

20 — допустимий поріг водного дефіциту (ΔW , л/об'єм зволоження).

Висновки

Таким чином, інтегрований метод призначення строків та норм поливу за краплинного зрошення винограду за даними поточних значень ET_o характеризується рядом істотних переваг, серед яких більш значущими є:

- висока точність строків поливу (мінімізація перевитрати води);
- об'єктивне врахування кліматичних умов (температура, вітер, вологість повітря, надходження сонячної радіації);
- оптимізація використання водних ресурсів у системах дефіцитного зрошення.

Список використаних джерел

1. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.
2. Bonada M., Catania A., Gambetta J., Petrie P. Soil water availability during spring modulates canopy growth and impacts the chemical and sensory composition of Shiraz fruit and wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2021. Vol. 27. № 4. P. 491–507. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12506>Digital Object Identifier (DOI).
3. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality / Chaves M. M. et al.. *Annals of Applied Biology*. 2007. Vol. 150(2). P. 237-252. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00123.x>Digital Object Identifier (DOI).
4. Effect of different deficit irrigation regimes on vine performance, grape composition and wine quality of the “Primitivo” variety under mediterranean conditions / Losciale P. et al. *Irrig Sci*. 2024. Vol. 42. P. 877–890. DOI:10.1007/s00271-024-00956-0.
5. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review / Rasheed M. W. et al. *Sustainability*. 2022. № 14. 25 p. <https://doi.org/10.3390/su141811538>.
6. Smith M. Cropwat. A computer program for irrigation planing. FAO irrigation and drainage paper. No. 46. Rome: FAO, 1992. 126 p.
7. Shtirbu A., Kovalova I., Vlasov V. Responses of Grapevines to Planting Density and Training Systems in Semiarid Environments. *Agricultural Science and Practice*. 2022. Vol. 9. № 2. P. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp9.02.038>.
8. Wang R., Yan P.K., Sun Q., Su B.F., Zhang J.X. Effects of regulated deficit irrigation on the growth and berry composition of Cabernet Sauvignon in Ningxia. *Int J Agric & Biol Eng*. 2019. Vol. 12(6). P. 102–109.

9. Вожегова Р. Зрошення – головний елемент сучасних агротехнологій в умовах Південного Степу України. *Вісник аграрної науки*. 2019. Т. 97. № 11. С. 67-74.
10. Ромащенко М. І. Концептуальні засади відновлення зрошення у південному регіоні України. *Меліорація і водне господарство*. 2013. Вип. 100. № 1. С. 7-17.

*A. Shtirbu, PhD, V. Palariev, third (educational and scientific) level of higher education
(Doctor of Philosophy) candidate*

National Scientific Center «V.YE. Tairov Institute of Viticulture and Winemaking»

INTEGRATED METHOD FOR DETERMINING THE DRIP IRRIGATION REGIME OF GRAPES BASED ON EVAPOTRANSPIRATION AND SOIL MOISTURE

The article presents methodological approaches to developing a model for determining the timing and norms of grape irrigation under drip irrigation conditions, which is based on the synthesis of evapotranspiration and soil moisture indicators, in order to rationalize the use of water resources, optimize the water balance of agrophytocenosis and increase the efficiency of the irrigation regime in the conditions of the Southern Steppe of Ukraine. It is shown that the integrated method for determining the drip irrigation regime of grapes based on current E_{To} values is characterized by a number of significant advantages: high accuracy of irrigation timing while minimizing excess water consumption; objectively takes into account climatic conditions - temperature, wind, air humidity, solar radiation; optimizes the use of water resources in deficit irrigation systems.

Keywords: grapes, irrigation, evapotranspiration, soil moisture.