

Міністерство освіти і науки України  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет



# РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

## Навчальний посібник

Для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
спеціальностей 192 «Будівництво та цивільна інженерія»  
194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології»

Дніпро  
ДДАЕУ  
2023

**УДК 631.67(075.8)**  
**Р 65**

*Рекомендовано до видання вченою радою Дніпровського державного аграрно-економічного університету  
(протокол № 9 від 29.06.2023 р.)*

**Рецензенти:**

**Андрій Шатковський**, доктор сільськогосподарських наук, професор, член-коресподент НААНУ, заступник директора Інституту водних проблем і меліорації НААНУ

**Валентина Гамаюнова**, доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри землеробства, геодезії та землеустрою Миколаївського національного аграрного університету,

**Юрій Ткаліч**, доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри загального землеробства та ґрунтознавства Дніпровського державного аграрно-економічного університету,

**Р 65** Доценко В.І., Запорожченко В.Ю., Коваленко В.В., Онопрієнко Д.М., Шинкаренко І.Ю.

Розрахунок режимів зрошення сільськогосподарських культур:  
Навчальний посібник. Дніпро: ДДАЕУ, 2023. – 356 с.

ISBN 978-966-921-345-7

Навчальний посібник присвячений розгляду загальних принципів розрахунків режимів зрошення сільськогосподарських культур в різних природно-кліматичних умовах з використанням зарубіжного досвіду розвитку поливних режимів. У посібнику представлена інформація про всі найбільш відомі методи розрахунків сумарного водоспоживання рослин і встановлення строків та норм поливів сільськогосподарських культур. Особливе місце в посібнику відводиться вибору метеорологічних даних року заданої забезпеченості та побудові графіків поливів.

Матеріал посібника рекомендовано для здобувачів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями 192 «Будівництво та цивільна інженерія», 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології», освітнього ступеня «бакалавр», а також для здобувачів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями 183 «Технології захисту навколишнього середовища», 101 «Екологія» та 201 «Агрономія», крім того буде корисним для фахівців проєктних і наукових організацій.

УДК 621.43.016 (075.8)

ISBN 978-966-921-345-7

# ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗРОШЕННЯ .....	10
1.1. Види зрошення .....	10
1.2. Вплив зрошення на ґрунт, рослини та мікроклімат .....	11
1.3. Способи зрошення .....	13
1.4. Зрошувальна система та її основні елементи .....	14
Питання для самоконтролю .....	16
2. ВИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЇ РЕЖИМІВ РОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГО- СПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР .....	17
2.1. Проектні і експлуатаційні режими зрошення .....	17
2.2. Класифікація режимів зрошення за можливістю їх реалізації .....	18
2.3. Класифікація режимів зрошення за впливом на ґрунти та інші природні умови .....	18
2.4. Способи призначення режимів зрошення .....	20
Питання для самоконтролю .....	22
3. ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГОС- ПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР .....	23
3.1. Оптимальні умови для розвитку сільськогосподарських культур .....	23
3.2. Глибина активного кореневмісного шару ґрунту .....	26
3.3. Розрахункові схеми для визначення режиму зрошення сільськогоспо- дарських культур .....	28
Питання для самоконтролю .....	30
4. СУМАРНЕ ВОДОСПОЖИВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР .....	31
4.1. Розрахунок сумарного водоспоживання методом О.М. Костякова .....	32
4.2. Розрахунок сумарного водоспоживання біокліматичним методом А.М. і С.М. Алпатьєвих .....	34
4.3. Удосконалений біокліматичний метод В.П. Остапчика .....	36
4.4. Біофізичний метод Д.А. Штойко .....	39
4.5. Комплексний (тепловоднобалансовий) метод С.І. Харченка .....	40
4.6. Визначення сумарного водоспоживання методом В.С. Мезенцева .....	43
4.7. Визначення сумарного випаровування методом О.Р. Костянтинова .....	48
4.8. Термічні методи визначення сумарного водоспоживання .....	51
4.9. Методи розрахунку сумарного водоспоживання розроблені закордон- ними вченими .....	53
4.10. Розрахунок сумарного водоспоживання методом ФАО .....	60
4.11. Сумарне випаровування в умовах обмеженого зволоження .....	74
4.12. Вплив засолення ґрунту на водоспоживання рослин (евапотранспіра- цію) .....	82
Питання для самоконтролю .....	89
5. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СУМАРНЕ ВОДОСПОЖИВАННЯ .....	91

5.1. Місцеположення.....	91
5.2. Сонячна радіація.....	91
5.3. Атмосферний тиск.....	107
5.4. Прихована теплота пароутворення.....	108
5.5. Психрометрична постійна ( $\gamma$ ).....	108
5.6. Температура повітря.....	109
5.7. Вологість повітря.....	110
5.8. Швидкість вітру.....	118
5.9. Відсутність кліматичних даних.....	120
Питання для самоконтролю.....	130
<b>6. ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ ВОДНОГО БАЛАНСУ, ЩО ФОРМУЮТЬ РЕЖИМ ЗРОШЕННЯ.....</b>	<b>131</b>
6.1. Врахування атмосферних опадів.....	131
6.2. Визначення об'єму втрат на поверхневий та глибинний скид.....	141
6.3. Визначення інтенсивності підживлення ґрунтовими водами розра- хункового кореневмісного шару ґрунту.....	143
Питання для самоконтролю.....	149
<b>7. ЗРОШУВАЛЬНА І ПОЛИВНА НОРМА.....</b>	<b>150</b>
7.1. Зрошувальна норма.....	150
7.2. Поливна норма.....	151
Питання для самоконтролю.....	156
<b>8. ПРИЗНАЧЕННЯ СТРОКІВ ПОЛИВІВ.....</b>	<b>157</b>
8.1. Графоаналітичний метод визначення строків поливу.....	157
8.2. Графічний метод визначення строків поливу.....	158
8.3. Табличний спосіб визначення строків поливу.....	160
Питання для самоконтролю.....	161
<b>9. ПРАКТИКУМ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ.....</b>	<b>162</b>
Вправа 9.1. Розрахунок режиму зрошення методом О.М. Костякова.....	163
Вправа 9.2. Розрахунок режиму зрошення біокліматичним методом А.М. та С.М. Алпатьєвих.....	171
Вправа 9.3. Розрахунок режиму зрошення удосконаленим біокліматич- ним методом В.П. Остапчика.....	177
Вправа 9.4. Розрахунок режиму зрошення біофізичним методом Д.А. Штойко.....	181
Вправа 9.5. Розрахунок режиму зрошення методом ФАО.....	184
<b>10. ВИБІР РОКУ ЗАДАНОЇ ЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ.....</b>	<b>193</b>
10.1. Оцінка природного зволоження.....	193
10.2. Вибір року заданої забезпеченості за атмосферними опадами.....	204
10.3. Вибір року заданої забезпеченості за комплексним кліматичним показником.....	206
10.4. Вибір року заданої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання сільськогосподарських культур методом реального року.....	212



10.5. Вибір року заданої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання сільськогосподарських культур методом компоновки .....	216
Питання для самоконтролю .....	218
11. ГРАФІКИ ПОЛИВІВ .....	223
11.1. Спеціалізація поливів за господарським призначенням .....	223
11.2. Графіки поливів сільськогосподарських культур в сівозміні .....	226
11.3. Графіки гідромодулів.....	237
Питання для самоконтролю .....	237
12. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ ПІД РІЗНІ СПОСОБИ ПОЛИВУ .....	238
12.1. Розрахунок режимів зрошення під рисові сівозміни.....	238
12.2. Проєктування режиму зрошення під системи краплинного зрошення	247
12.3. Поливний режим зрошуваних культурних пасовищ.....	256
12.4. Особливості поливного режиму стічними водами .....	261
12.3. Режим зрошення сільськогосподарських культур в теплицях .....	268
Питання для самоконтролю .....	268
13. АВТОМАТИЗАЦІЯ І ОПЕРЕТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ ПОЛИВІВ .....	270
13.1. Організація встановлення поливного режиму сільськогосподарсь- ких культур .....	270
13.2. Основні завдання організації оперативного поливного режиму сільськогосподарських культур .....	272
13.3. Черговість проведення поливів.....	274
13.4. Недоліки та проблеми впровадження інформаційно-дорадчої сис- теми.....	275
13.5. Методи і засоби вимірювання запасів вологи в ґрунті .....	277
13.6. Приклади розрахунку прогнозування поливу при відомих запасах вологи .....	294
Питання для самоконтролю .....	295
14. РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ ЗРОШЕННЯ АГРОГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИМ МЕТОДОМ О.Ф. ЛИТОВЧЕНКА .....	296
14.1. Розрахунок показника попередніх умов .....	297
14.2. Розрахунок запасів вологи під різними сільськогосподарськими ку- льтурами .....	299
14.3. Встановлення поливного режиму сільськогосподарських культур конкретного року.....	307
14.4. Розрахунок проєктного режиму зрошення під певну забезпеченість ..	310
Питання для самоконтролю .....	314
15. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗРОШУВАЛЬНОЇ ВОДИ.....	315
Питання для самоконтролю .....	316
ВИСНОВОК.....	317
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА .....	320
ДОДАТКИ.....	324

Додаток А. Глибина активного шару ґрунту та нижня допустима границя зволоження за фенологічними фазами розвитку сільськогосподарських культур .....	324
Додаток Б. Орієнтовне середньо декадне водоспоживання сільськогосподарських культур, % (чисельник) і глибина розрахункового кореневмісного шару ґрунту, м (знаменник) .....	325
Додаток В. Поправочний коефіцієнт для приведення температури повітря до 12-годинної тривалості дня .....	327
Додаток Г. Значення біологічних коефіцієнтів біологічної кривої $k_6$ залежно від виду сільськогосподарської культури та сум приведених середньодобових температур повітря $\sum t_{np}$ .....	328
Додаток Д. Агрометеорологічні параметри сільськогосподарських культур для розрахунку режимів зрошення удосконаленим біокліматичним методом В.П. Остапчика .....	333
Додаток Е. Пружність насичення водяного пару $l_a$ , мб .....	338
Додаток Ж. Єдині (осереднені за часом) коефіцієнти культур КС і середня максимальна висота рослин для не схильних до стресу, добре зволжених культур в субвологому кліматі ( $RH_{\min} \approx 45\%$ , $u_2 \approx 2$ м/с) з використанням рівняння Пенмана-Монтейта $E_0$ .....	339
Додаток К. Границі максимальної ефективної глибини коріння ( $Z_r$ ) і частка забору води без стресу ( $p$ ), для загальних культур .....	343
Додаток Л. Солестійкість сільськогосподарських культур, виражена через електричну провідність насиченої витяжки на порозі, коли врожайність опускається нижче повного потенціалу врожайності ( $EC_{e,threshold}$ ) і через похил ( $b$ ) зменшення врожайності при збільшенні засолення вище $EC_{e,threshold}$ .....	345
Додаток М. Добова позаземна ( $R_a$ ) для різних широт для 15-ї доби місяця, значення в МДж/(м <sup>2</sup> добу) .....	347
Додаток Н. Порядковий номер в році .....	348
Додаток О. Середні денні години для різних широт для 15-ї доби місяця ...	349
Додаток П. $\sigma T_K^4$ (Закон Стефана-Больцмана) при різних температурах ( $T$ ). ...	350
Додаток Р. Градієнт кривої тиску пару ( $\Delta$ ) для різних температур ( $T$ ).....	351
Додаток С. Режим зрошення сільськогосподарських культур для років забезпеченостей 75 % за дефіцитом водоспоживання при доброму ґрунто-екологічному стані земель України.....	352
Додаток Т. Зрошувальні норми сільськогосподарських культур при водозберігаючих режимах зрошення (за кліматичними зонами України) .....	355

## ВСТУП

За оцінками Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО) агроресурсний потенціал України дає змогу виробляти сільськогосподарську продукцію в обсягах, що забезпечують продуктами харчування не менш як 450–500 млн осіб. Сьогодні ці можливості використовуються не більше ніж на третину, хоча Україна в повному обсязі забезпечує свою продовольчу безпеку, є найбільшим виробником та експортером соняшникової олії, третім світовим експортером кукурудзи, четвертим – ячменю, шостим – соєвих бобів, сьомим – курятини (Стратегія розвитку зрошення..., 2019).

Недостатній рівень використання наявного агроресурсного потенціалу обмежується певними факторами, головними із яких є неоптимальні умови природного вологозабезпечення на більшій частині території України, які постійно погіршуються у зв'язку з глобальними змінами клімату.

Агрокліматична зона Степу та значної частини Лісостепу становлять важливу базу землеробства України. Вони вирізняються родючими ґрунтами, достатком тепла, тривалим безморозним періодом. Ці умови дають можливість вирощувати цінні сорти пшениць, овочеві, технічні, кормові культури, багаторічні плодові насадження і виноградники. Але врожайність усіх сільськогосподарських культур тут нестійка через дефіцит природного зволоження, часті посухи та суховії.

Застосування зрошення та дренажу дає змогу незалежно від погодних умов підвищити врожайність сільськогосподарських культур у два-три рази порівняно з незрошуваними умовами.

В умовах, що склалися, відновлення зрошення та дренажу є ключовим інструментом розвитку аграрного сектору економіки та нарощування експортного потенціалу України, мінімізації впливу клімату на процеси соціально-економічного розвитку регіонів.

Стан меліоративного землеробства за рівнем використання наявних потужностей інженерної інфраструктури зрошення та дренажу може бути охарактеризований як кризовий із загрозою погіршення.

Вирішення завдання нарощування обсягів зрошення передбачено схваленими Кабінетом Міністрів України «Стратегією зрошення і дренажу в Україні на період до 2030 року» (Стратегія розвитку зрошення..., 2019) та «Планом заходів із реалізації Стратегії зрошення і дренажу в Україні на період до 2030 р.» (План заходів..., 2020). Ви-

конання завдань «Стратегії...» в частині збільшення площі поливів до 2030 року на 1,0–1,2 млн га буде вимагати залучення значних (не менше 4,0 – 4,5 млрд м<sup>3</sup>) додаткових об'ємів води. Зважаючи на те, що зміна клімату негативно впливає не тільки на умови природного забезпечення водою, а й на стан забезпечення придатними до використання водними ресурсами (Вплив сучасних... 2020), раціональне та ефективне використання води на зрошення є важливою умовою нарощування потенціалу зрошення і від рівня його розв'язання значною мірою буде залежати можливість та обсяги вирішення завдання розширення площ поливів (Концептуальні засади... 2022).

У свою чергу, аналіз тенденцій розвитку зрошення на сучасному етапі свідчить, що головними складовими розв'язання завдання ефективного використання води при зрошенні є застосування водозберігаючих способів зрошення (різновиди краплинного та низьконапірного дощування) та використання систем підтримки прийняття рішень при управлінні поливами (Rinaldi M., 2014). Системи підтримки прийняття рішень у зрошенні є інструментами, які застосовують при управлінні технологічними процесами поливу з метою отримання найвищих урожаїв шляхом регулювання подачі води рослинам відповідно до їх водопотреби протягом усього періоду вегетації.

Як свідчить аналіз наукових публікацій, в основі системи підтримки прийняття рішень у зрошенні зазвичай лежать моделі накопичення біомаси та моделі евапотранспірації (Ромашенко М.І. та ін., 2019). За цього найпоширенішим є підхід, заснований на наявності взаємозв'язку між сезонною транспірацією культур за оптимального забезпечення вологою та їх біомасою (Концептуальні засади... 2022).

Забезпечення необхідного режиму водоподачі при зрошенні здійснюється із застосуванням різноманітних методів (Ma L. et al. 2012; Sharma N., et al , 2021), серед яких виокремлюють підхід, що базується на оцінюванні стану рослин та підхід, заснований на контролюванні вологозабезпечення кореневого шару ґрунту (Campbell G.S. et.al, 1982; Jones H.J., 2004). Відомо, що технологічною основою реалізації необхідного режиму подачі води рослинам є режим зрошення (Ромашенко М.І. та ін., 2009). Саме методологічний рівень формування режиму зрошення буде визначати основні можливості та складові ефективного та екологічно-безпечного використання та продуктивність поливної води при управлінні поливами.

Режим зрошення є одним з найважливіших елементів технологій вирощування сільськогосподарських культур на поливних землях. Це

комплексний захід, що складається з розподілу у часі кількості та норм різних видів поливів, залежно від біологічних особливостей рослин, екологічного стану зрошуваних земель, погодних умов вегетаційного періоду, способів поливу, наявності водних, енергетичних, агротехнічних, фінансових ресурсів та запланованого рівня врожаю. Він повинен забезпечувати оптимізацію водного режиму ґрунту і фітотоклімату посівів, виключення гравітаційних втрат води за межі зони активного вологообміну та сприяти найбільш повному використанню рослинами біокліматичного потенціалу регіону, родючості ґрунтів, генетичних особливостей сортів і гібридів, поживних речовин тощо (Вожегова Р.А., та ін., 2015).

В цьому навчальному посібнику розглянуті особливості застосування різних підходів до формування і розрахунків режимів зрошення сільськогосподарських культур залежно від природних, кліматичних, агротехнологічних, екологічних, економічних умов, застосування нових розрахункових методів на основі визначення середньодобового випаровування води з ґрунту і рослин, тощо.

# 1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗРОШУВАННЯ

*Зрошення* (зрошування, *irrigation*) – це комплекс заходів з проведення поливів, направлених на поліпшення водного режиму ґрунтів і рослин, що відчують в природних умовах дефіцит вологи. Штучне зволоження ґрунту підвищує його забезпеченість вологою, поліпшує екологічний режим ґрунту і рослин, мікроклімат приземного шару ґрунту, в результаті підвищується урожайність сільськогосподарських культур. В виробничих умовах зрошування здійснюють за допомогою комплексу гідротехнічних та інженерно-технічних споруд, що називають зрошувальною системою [Рокочинський А.М. та ін., 2015].

## 1.1. Види зрошування

Залежно від вимог сільськогосподарського виробництва, що висуваються до зрошування, від характеру джерела зрошення та місцеположення зрошуваної площі по відношенню до нього, від кліматичних та ґрунтових умов розрізняють такі види зрошування та обводнювання:

1. Постійно діюче зрошення («правильне»):

а) самопливне;

б) з механічним підйомом води з річок, водосховищ або за рахунок видобування ґрунтових вод.

2. Одноразово діюче зрошення («неправильне»):

а) паводкове (з каналів, що працюють в період паводків в річці);

б) лиманне – шляхом затримання поверхневих вод весняного стоку.

3. Обводнювання місцевості шляхом будівництва водосховищ або водоводів, каналів, вода яких використовується для господарських потреб, сільськогосподарського водопостачання та зрошування невеликих ділянок.

За дією на ґрунт та рослини зрошування поділяють на зволожувальне, удобрювальне та спеціальне.

**Зволожувальне зрошення** застосовують для зволоження ґрунту в період вегетації рослин в потрібні строки. При регулярно діючому зрошенні вологість ґрунту підтримують на оптимальному рівні. Таке зволоження переважає в Україні та інших країнах (Доценко В.І., та ін., 2014).

**Удобрювальне зрошування (фертигація)** застосовують для внесення добрив в ґрунт за допомогою зрошувальної води, яка є розчин-

ником добрив, транспортує їх до рослин. До цього виду зрошення можна віднести поливи стічними водами міської каналізації, промислових підприємств та тваринницьких комплексів, а також поливи водами, що містять велику кількість завислих наносів, які випадають на полі та удобрюють їх. Удобрювальне зрошення поки ще мало розповсюджене і займає біля 1 % зрошуваних площ. Хоча сучасні ділянки краплинного зрошення широко застосовують удобрювальні поливи, як один із технологічних процесів вирощування овочів та фруктів. Удобрювальні поливи поєднують зі зволожувальними (Ківер В.Х., Онопрієнко Д.М., 2016).

*Спеціальне зрошення* має багато призначень і включає: тепловальне, окиснювальне, ґрунтоочисне та ін.

*Утеплювальне зрошення* застосовують для підігріву ґрунту шляхом поливу його водою, більш теплою ніж повітря і ґрунт. Для цього використовують відпрацьовані води теплоцентралей, атомних і теплових електростанцій, термальні води. Утеплювальне зрошення є сприятливим заходом при боротьбі з весняними заморозками.

При *окиснювальному зрошенні* поливну воду збагачують киснем та подають на поля, ґрунти яких бідні киснем (заплавні луки, рисові поля).

*Ґрунтоочисне зрошення* застосовують для виведення з ґрунту надлишку солей, знищення шкідників сільськогосподарських рослин (мишей, личинок хрущів) шляхом затоплення водою ґрунту, що очищається.

## **1.2. Вплив зрошення на ґрунт, рослини та мікроклімат**

Дія зрошення на розвиток рослин проявляється, по-перше, шляхом поповнення дефіцитів необхідної для рослин вологи та поживних речовин; по-друге, шляхом впливу на мікроклімат приземного шару повітря, на температуру та рослини, на фізико-хімічні та біологічні процеси в ґрунті.

Рослини для успішного свого розвитку та утворення високих врожаїв потребують одночасного та безперервного повного припливу необхідної їм в кожен фазу розвитку кількості вологи, поживних речовин, тепла, світла ґрунтового повітря. Тому при зрошенні врожайність сільськогосподарських культур визначається не тільки кількістю води, а й сукупністю всіх необхідних їм факторів росту при даних умовах.

Якщо при певних ґрунтових, кліматичних умовах та агротехніці, що забезпечують рослинам потрібну кількість тепла, світла та поживних речовин, підвищувати кількість поданої зрошувальної води, залишивши без змін інші фактори розвитку, то врожаї спочатку будуть збільшуватись, а потім цей ріст припиниться і рослини стануть зазнавати нестачу поживних речовин, ґрунтового повітря або інших факторів, необхідних для підвищення врожайності.

Крім підвищення вологості, зрошувальна вода приносить з собою на поле розчинені на завислі речовини, серед яких є і потрібні для рослин. Вода розчиняє також поживні речовини, що знаходяться в ґрунті та недоступні для рослин в нерозчиненій формі. Отже, зрошування може підвищувати кількість поживних речовин в даному ґрунті. Але при сильному зволоженні розчинені поживні речовини можуть вимиватись з верхніх шарів ґрунту.

Тому зрошування повинне проводитись в суворо нормованій кількості, що виключає можливість поверхневого стоку зрошувальної води та проникнення її в глибокі шари, нижче активного (кореневмісного) шару ґрунту. Проникнення води в глибокі шари ґрунту недопустиме не тільки внаслідок втрат води та поживних речовин, але і тому, що може викликати підйом рівня ґрунтових вод, заболочення та засолення ґрунту. Надмірна кількість поданої на зрошування води, крім того, затримує строки дозрівання деяких культур. При надмірному зволоженні структура ґрунту руйнується, зменшується його шпаруватість та погіршується водообмін.

При недостатній кількості вологи в ґрунті затухають мікробіологічні процеси, підвищення ж його вологості призводить до росту життєдіяльності мікроорганізмів.

Зрошування, особливо дощуванням та дрібнодисперсне, сприятливо діє на мікроклімат приземного шару повітря зрошуваних полів. Вдень поливи знижують максимальну температуру повітря, а вночі підвищують мінімальну. При зрошуванні підвищується відносна вологість повітря на 20–50 %. При наявності лісосмуг вплив зрошування на мікроклімат посилюється.

Отже, наявність в ґрунті достатньої кількості вологи утворює сприятливі умови для протікання фізіологічних процесів, позитивно діє на продуктивність сільськогосподарських культур та якість врожаю.

За словами відомого вченого-меліоратора О.М. Костякова «Якщо ж негативні явища і виникають, то вони є результатом не зрошування



як такого, а неправильного його застосування і особливо безпланової та надмірної витрати зрошувальної води».

### 1.3. Способи зрошування

Залежно подачі води до ґрунту зрошування розділяють на шість основних способів:

1. *Поверхнево-самопливне*, при якому вода розподіляється по поверхні ґрунту шляхом напуску її в борозни, смуги або чеки. При цьому зволожується тільки ґрунт, рослини і приземний шар повітря не зволожуються.

2. *Дощування*, при якому вода розподіляється над поверхнею поля у вигляді дощу спеціальними машинами, установками або агрегатами. При цьому зволожується ґрунт, рослини та приземний шар повітря.

3. *Дрібнодисперсне (аерозольне)*, при якому вода розподіляється над поверхнею поля у вигляді найдрібніших краплинок (аерозолів), що зволожують приземний шар повітря, рослини та частково поверхню ґрунту.

4. *Краплинне*, при якому поливається невелика площа, що знаходиться безпосередньо під рослинами. Рослини і приземний шар повітря не зволожується. При цьому затрачається набагато менше води в порівнянні з іншими способами зрошення.

5. *Внутрішньогрунтове*, що здійснюється введенням води в підорний шар ґрунту. При цьому підтримується оптимальна вологість кореневмісного шару, зберігається структура ґрунту. Верхній 10-сантиметровий шар ґрунту недозволожується, що є недоліком особливо в початковій фазі розвитку рослин.

6. *Підземне (субіригація)*, при якому зволожується кореневмісний шар ґрунту шляхом штучного підняття та підтримання рівня ґрунтових вод. Потребує великих затрат прісної води. Непридатний для зрошення посушливих районів, тому застосовується, в основному, як додаткове зволоження ґрунту на осушувальних системах.

Режим зрошення в тій чи іншій мірі залежить від способу поливу і його елементів. Так, наприклад, при зрошенні дощуванням великими поливними нормами може накопичуватись вода на поверхні ґрунту та викликати поверхневий стік і ерозію ґрунту (Ромащенко М.І. та ін., 2009). При зрошенні поверхнево-самопливним способом, навпаки – малими поливними нормами можливе нерівномірне зволоження ґрунту при розподілі її в борозни чи смуги. При зрошенні краплин-

ним способом зрошення ґрунту відбувається не всього поля, а тільки осередків біля рослин. Міжряддя при цьому залишаються не зволоженими. Це сприяє економії води. (Доценко В.І., Морозов В.В., Онопрієнко Д.М., 2014).

#### **1.4. Зрошувальна система та її основні елементи**

Зрошення земель різними способами здійснюється на зрошувальній системі.

*Зрошувальна система* – це територія, що підлягає зрошенню разом з мережею каналів, гідротехнічних та експлуатаційних споруд, які забезпечують забір води з джерела, транспортування та розподіл її для зрошення.

До складу постійної зрошувальної системи крім земельної території входять:

- 1) джерело зрошення (річка, ставок, озеро, підземні або стічні води), яке повинне повністю задовольнити потреби зрошувальної системи у воді;
- 2) водозабірна споруда (або насосна станція), що подає воду з джерела в канал або трубопровід;
- 3) зрошувальна мережа, що складається з провідних каналів або розподільних трубопроводів;
- 4) тимчасова зрошувальна мережа, що розподіляє воду всередині поливних ділянок;
- 5) дренажно-скидна мережа, що перехоплює зливові, скидні та ґрунтові води і відводить їх у водоприймач;
- 6) гідротехнічні споруди на відкритій зрошувальній мережі, які призначені для регулювання витрат, швидкостей та горизонтів води в каналах;
- 7) споруди та арматура на закритій зрошувальній мережі (розподільні та скидні колодязі, вантузи та противоударні пристрої);
- 8) лісосмуги, що застерігають поля від шкідливої дії вітру;
- 9) дороги, які необхідні для проведення експлуатаційних заходів;
- 10) пристрої автоматики та зв'язку;
- 11) виробничі та побутові будівлі.

У деяких випадках зрошувальна система, залежно від її розмірів, може не мати окремих перелічених вище елементів.

Незалежно від типу та конструкції постійно діюча зрошувальна система повинна задовольняти таким вимогам:

- подавати воду на поле в будь який час і в необхідній кількості;

- мати мінімальні втрати на фільтрацію, випаровування та скид;
- займати мінімальну площу відчужень під всі елементи зрошувальної системи (мати високий коефіцієнт земельного використання);
- забезпечувати якісний полив та високий коефіцієнт використання води;
- мати мінімальну вартість будівництва та експлуатації (мінімальний термін окупності);
- забезпечувати отримання проєктної врожайності сільськогосподарських культур.

В Україні в минулому були побудовані досить великі зрошувальні системи (табл. 1.1). Вони призначені для забору води із поверхневих джерел і перекидання її на великі відстані. Використовуючи ці зрошувальні системи можна полоти весь південь України (Балюк С.А., Ромащенко М.І. та ін., 2009). Нажаль, в сучасних умовах ці системи знаходяться в занепаді, через ряд економічних і політичних негараздів. Однак багато передових господарств розуміючи, що отримати відносно високі і стабільні врожаї неможливо починають відроджувати частково ці системи, хоча не в повному обсязі.

**Таблиця 1.1 – Найбільші зрошувальні системи України**

Зрошувальна система	Область	Площа зрошуваних земель тис. га	
		на 1990 р.	на перспективу
Бортницька	Київська	40,4	40,4
Дунай-Дніпровська	Одеська	45,0	200
Зрошування в зоні каналу Дніпро-Донбас	Харківська, Дніпропетровська	165	240
Зрошуванні в зоні Північно-Кримського каналу	Херсонська, Республіка Крим	312	539
Інгулецька	Миколаївська	62,7	62,7
Каховська	Херсонська, Запорізька	262	750
Краснознам'янська	Херсонська	96,7	96,7
Нижньодністровські	Одеська	37,0	53,2
Північно-Рогачицька	Запорізька	109	206
Приазовська	Донецька, Запорізька	29	124
Татарбунарська	Одеська	30,0	30,0
Кільченська	Дніпропетровська	36,0	36,0
Явкинська	Миколаївська	43,8	97,0

При відновленні зрошувальних систем найчастіше застосовують дощування, із широкозахватними дощувальними машинами закордонного виробництва Reinke, Zimmatic, Valley, T-L (виробництва США), Bauer (Австрія), Othec (Франція), RKD (Іспанія) та інші. Первомайський завод «Фрегат» (Миколаївська обл.) освоїв виробництво нових дощувальних машин, які відповідають показникам закордонного виробництва.

Крім широкозахватних дощувальних машин широко застосовуються шлангобарабанні дощувальні машини для зрошення невеликих фермерських ділянок: Huedig, Beinlich (Нієччина), Irrifrance Optima (Франція), Osmis, Irtec (Італія), Rainstar (Австрія) та багато інших (Доценко В.І., Морозов В.В., Онопрієнко Д.М., 2014). Для зрошення овочевих сівозмін та садів застосовуються системи краплинного зрошення (Ромащенко М.І. та ін., 2007, 2015).

У той же час на ділянках де дощувальні машини відпрацювали свій строк і немає можливості їх відновити, застосовують, як тимчасовий захід, поверхнево-самопливний спосіб поливу (Доценко В.І., та ін. 2020).

Формування нової державної політики щодо розвитку зрошення має враховувати умови застосування різних способів поливу, особливо з огляду на їхню енерго- та матеріалоемність, екологічну безпечність.

Очевидно, у найближчі 10–15 років найбільші площі поливатимуться за допомогою дощування, але його частина з майже 95 % зменшиться до 80–85 % за рахунок зростання обсягів застосування краплинного зрошення й мікродощування, а також повернення до поверхневого способу поливу. При цьому дощування широкозахватними дощувальними машинами фонтального й колового типів нового покоління з регульованою інтенсивністю водоподачі застосовуватиметься для поливу зернових і технічних культур, а краплинне зрошення – для поливу овочевих і технічних культур, а також садів, ягідників і виноградників. Поверхневий спосіб поливу можна застосовувати для зрошення овочевих, технічних, плодоягідних культур, але лише за умови наявності відповідних ґрунтових умов і переходу на поливи з імпульсним режимом водоподачі.

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Які виділяють види зрошення?*
- 2. Які види зрошення називають «правильними», а які «неправильними»? Чому?*
- 3. Як впливає зрошення на ґрунт, рослини і мікроклімат? Чому може виникнути негативний вплив зрошення?*
- 4. Які способи зрошення застосовують?*
- 5. Що таке зрошувальна система? З яких елементів вона складається?*

## 2. ВИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЇ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

*Режим зрошення* – сукупність кількості, норм та строків поливів сільськогосподарських культур. Обґрунтовані строки і норми поливу культур в конкретних кліматичних (метеорологічних), ґрунтових, агротехнічних умовах встановлюються з виробничого досвіду, польових досліджень або розрахунковим шляхом з урахуванням техніки і способів поливу, глибини залягання і мінералізації ґрунтових вод, біологічних особливостей вирощуваних культур, наявності водних, енергетичних та інших ресурсів й господарських умов.

### 2.1. Проектний і експлуатаційний режими зрошення

В гідромеліоративній практиці розрізняють проектний та експлуатаційний режими зрошення.

*Проектний режим зрошення* розробляють на стадії проектування зрошувальних систем для виконання водогосподарських розрахунків та встановлення витратних характеристик зрошувальної мережі. Розрахункові параметри проектного режиму зрошення визначають з урахуванням прийнятих в проекті способів, техніки та технології поливу для економічного обґрунтування рівня водозабезпеченості системи.

Проектний режим зрошення розробляють, як правило, на середньосухий рік 75 %-ї забезпеченості для забезпечення водою рослин в три роки із чотирьох, а один рік рослини будуть забезпечені не в повній мірі, але дадуть значно більший врожай, ніж без зрошення, де врожай взагалі може загинути.

В процесі експлуатації зрошувальної системи щорічно на майбутній вегетаційний період розробляють *експлуатаційні режими зрошення* для планування сезонного та оперативного, на одну-дві, декади внутрішньогосподарського водокористування.

*Сезонний режим зрошення*, або план водокористування розробляють на початку кожного поливного сезону. Він в кожному конкретному випадку повинен враховувати структуру посівних площ на майбутній сезон, зміни ґрунтово-меліоративних та організаційно-господарських умов, які неминуче виникають на зрошувальних системах в процесі їх багаторічної експлуатації.

*Оперативний режим зрошення* розробляють на майбутні одну-дві декади. При його розробці використовують сезонний режим зрошен-

ня, який постійно корегують залежно від поточних погодних та організаційно-господарських умов.

Сезонний режим зрошення розробляють як і проєктний для року 75 %-ї забезпеченості. Тому оперативний режим зрошення частіше за все потребує меншої кількості поливів. При реалізації оперативного режиму зрошення, коли випадають інтенсивні дощі, заплановані поливи потрібно переносити на більш пізні строки, а деякі можливо і відміняти зовсім.

## **2.2. Класифікація режимів зрошення за можливістю їх реалізації**

За можливістю реалізації режими зрошення поділяють на: – біологічно оптимальний, економічно обґрунтований, економічно доцільний, господарсько можливий і під запрограмований урожай.

*Біологічно оптимальний* – це такий режим зрошення, який забезпечує оптимальний водний, повітряний, тепловий і сольовий режим ґрунту для отримання максимально можливої урожайності в певних природних умовах і при певному способі поливу.

*Економічно обґрунтований* режим зрошення встановлюється на підставі техніко-економічних розрахунків і розробляється для проєктування зрошувальних систем під час оптимізації їх параметрів, обґрунтування площ і об'єму води для зрошення.

*Економічно доцільний* режим зрошення має місце тоді, коли лімітуючим фактором є водні ресурси, але зрошення все ще економічно доцільне.

*Господарський режим* зрошення формується з врахуванням наявності трудових ресурсів, оснащення господарств технікою і характеризується, як правило, зниженою кількістю поливів. Він не повинен бути меншим економічно доцільного.

## **2.3. Класифікація режимів зрошення за впливом на ґрунти та інші природні умови**

При зрошенні сільськогосподарських культур змінюється водний режим ґрунтів, що призводить до зміни їх властивостей що може призвести до зниження їх родючості і їх деградації. Залежно від впливу режиму зрошення на ґрунти їх поділяють (Методичні рекомендації ..., 2004):

*Оптимальний режим зрошення* – це режим зволоження ґрунту, який забезпечує максимальний можливий прибуток від зрошення при економічному використанні ресурсів, збереженні родючості ґрунтів, мінімальному негативному впливу на навколишнє природне середовище.

Планування оптимальних режимів зрошення рекомендується здійснювати, коли у господарстві визначена стратегія, спрямована на вирощування максимального можливих для даних природно-кліматичних умов врожаїв сільськогосподарських культур, коли для цього є необхідні кошти та матеріально-технічні ресурси. При дефіциті ресурсів оптимальні режими зрошення можуть плануватись на частині площі для культур, що мають найбільше господарське значення.

*Водозберігаючий режим зрошення* – це режим, при плануванні якого за критерій управління приймається умова мінімізації витрат поливної води на отримання одиниці врожаю. Зазначена умова реалізується шляхом зниження вологості ґрунту у некритичні фази розвитку сільськогосподарських культур на 5–10 % від граничної межі діапазону оптимального зволоження, що обумовлює незначні втрати врожаю (6–10 %), які однак можуть бути компенсовані за рахунок економії до 10–20 % поливної води.

Водозберігаючі режими зрошення доцільно планувати, коли існує дефіцит коштів та матеріально-технічних ресурсів для реалізації оптимальних поливів, або у господарстві прийнята стратегія істотної економії коштів при незначному зниженні врожайності.

*Ґрунтозахисний режим зрошення* – це режим, який в умовах незадовільного ґрунтово-екологічного стану земель сприяє разом з іншими агро меліоративними заходами збереженню родючості ґрунту за рахунок дотримання в оптимальному діапазоні показників родючості ґрунту та гідрогеолого-меліоративного стану земель.

Для визначення сприятливого і несприятливого стану земель необхідно дати визначення їх ґрунтово-екологічного і еколого-меліоративного стану.

*Ґрунтово-екологічний стан земель* – комплексна характеристика стану родючості ґрунту та гідрогеолого-меліоративного стану земель, яка може визначатись якісно та кількісно на основі певних критеріїв оцінки відхилень фактичних показників гідрогеолого-меліоративного стану земель (рівень і мінералізація ґрунтових вод, стан засолення ґрунтів властивостей ґрунту (агрофізичних, фізико-хімічних і агрохі-

мічних) від вихідного (до початку ведення зрошення) та оптимального їх рівня.

*Еколого-меліоративний стан земель* – комплексна характеристика геологічного середовища, що зазнало впливу зрошувальних меліорацій за певний період. Показники еколого-меліоративного стану земель – параметри та їх критерії, що характеризують гідрогеологічні, інженерно-геологічні, ґрунтово-меліоративні умови, забруднення ґрунтів і вод.

Ґрунтозахисні режими зрошення рекомендується впроваджувати при незадовільному ґрунтово-екологічному стані земель, що визначається суттєвим погіршенням родючості ґрунтів (ущільнення, дегуміфікація, засолення, осолонцювання та ін.) внаслідок недотримання комплексу агротехнічних технологій (неоптимальне внесення добрив, відсутність агро-меліоративних заходів), а також тривалого інтенсивного некоректного зрошення при відсутності дренажу або його незадовільному технічному стані (вторинне засолення, осолонцювання, високі рівні ґрунтових вод); у разі незадовільного вихідного еколого-меліоративного стану земель (ерозійно небезпечні площі, території зі слабким дренаванням).

За таких умов застосування оптимальних і водозберігаючих режимів зрошення є неефективним внаслідок нераціонального використання води (поверхневий стік, боковий і глибинний відтік); небезпеки подальшого розвитку деградаційних процесів у ґрунті та неможливості отримання запланованих рівнів врожаю без впровадження на цих землях протягом певного періоду комплексу агро-меліоративних заходів з відновлення родючості ґрунтів.

Режим зрошення можна розробляти виходячи також із конкретної величини *запрограмованого врожаю*. Поряд із відповідним режимом зрошення розробляють інші заходи по вирощуванню культури (застосування добрив, агротехніки, прогресивних сортів та ін.).

## **2.4. Способи призначення режимів зрошення**

Для встановлення режимів зрошення і зокрема визначення строків поливу можна застосовувати такі групи методів: за вологістю ґрунту, за фазами росту і розвитку рослин, за морфологічними ознаками, за фізіологічними показниками (Вожегова Р.А. та ін., 2015).

*Призначення поливів за вологістю ґрунту* ґрунтується на встановленні фактичної вологості під посівами сільськогосподарських



культур і порівнянні її з допустимою, щоб поливати саме в той момент, коли запаси вологи зменшаться до нижньої допустимої межі. Вологість ґрунту при цьому можна вимірювати безпосередньо на полі прямими і непрямыми способами, розраховувати балансовим чи іншими способами. На сьогодні він є найбільш теоретично обґрунтованим і практичним для реалізації, тому його застосовують в більшості випадків, і в цьому посібнику йому приділяється найбільше уваги.

**Призначення поливів за фазами росту і розвитку рослин.** Цей метод оснований на неоднаковій чуйності рослин до зниження вологості в різні періоди їх росту і розвитку. Поливи призначають пов'язуючи їх до часу настання певних фенологічних фаз розвитку. Через те, що постійно змінюються погодні умови, необхідність в поливі не завжди виникає при настанні критичних фаз розвитку. Тому строки і норми поливів в цьому випадку потрібно корегувати. Цей метод є добрим доповненням для попереднього способу.

**Призначення поливів за морфологічними показниками.** За цим способом, по забарвленню або частковому в'яненню листків в денну пору визначають, коли необхідно проводити полив. Нажаль, настання таких станів рослин відбувається при пригніченні їх росту, коли вони втрачають деяку здатність до відновлення, тому поливи за цим способом призначаються із запізненням, що призводить до суттєвої втрати врожаю.

**Призначення поливів за фізіологічними показниками.** Спосіб дозволяє з великою точністю визначити строки поливу, враховуючи взаємозв'язок вологості ґрунту і ступінь водозабезпеченості рослин. Для визначення строків поливу практичну цінність має всмоктуюча сила клітин листя і концентрація сухих речовин в віджатому соку з листка. При цьому способі поливну норму встановлюють на підставі кореляційного зв'язку між фізіологічними показниками рослин і вологістю в активному шарі ґрунту. Однак, цей метод потребує велику кількість лабораторних досліджень і не може бути придатним для широкого застосування.

Отже, для практичного використання найбільш придатним є перший метод встановлення строків поливу (режиму зрошення) – за вологістю ґрунту.

Для визначення оптимального режиму зрошення сільськогосподарських культур (вологості ґрунту) самим надійним, але в той же час, найбільш трудомістким та вартісним є метод польового дослідю. Тому у вітчизняній та зарубіжній практиці проектування та експлуа-

тації гідромеліоративних систем широке значення отримали розрахункові методи встановлення режимів зрошення сільськогосподарських культур.

В меліоративній практиці широкого впровадження набули комбіновані методи контролю за рівнем вологості в ґрунті, в яких запаси вологи на початку вегетаційного періоду визначають інструментальними методами, а в подальшому – розрахунковими. З метою постійного контролю за динамікою запасів вологи під конкретною культурою, або під декількома в сівозміні, доцільно мати спеціальну відомість, в яку заносять добові параметри витрат вологи рослинами та надходження її на поле.

Враховуючи зниження запасів вологи за рахунок щоденного випаровування можна контролювати кількість ефективної вологи в ґрунті. Віднімаючи від цього показника середньодобові витрати води і додаючи надходження за рахунок дощів – отримують залишок легкодоступної вологи в ґрунті.

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Що називають режимом зрошення?*
- 2. Що таке проєктні режими зрошення?*
- 3. Для яких потреб розробляють проєктний режим зрошення?*
- 4. Які особливості встановлення експлуатаційного режиму зрошення?*
- 5. Які особливості розробки сезонного і оперативного режиму зрошення?*
- 6. Що таке біологічно оптимальний, економічно обґрунтований, економічно доцільний і господарський режими зрошення?*
- 7. Який режим зрошення називають оптимальним?*
- 8. В чому сутність розробки водозберігаючого режиму зрошення?*
- 9. Яка особливість ґрунтозахисного режиму зрошення?*
- 10. Що включає в себе ґрунтово-екологічний стан земель?*
- 11. Що розуміють під терміном еколого-меліоративний стан земель?*
- 12. Як призначають поливи за вологістю кореневмісного шару ґрунту?*
- 13. Яка особливість призначення поливів за фазами росту і розвитку рослин?*
- 14. Як призначають поливи за морфологічними показниками рослин?*
- 15. Які фізіологічні показники рослин необхідно враховувати при призначенні поливів?*
- 16. Який із способів призначення режимів зрошення найбільш теоретично обґрунтований і частіше застосовується в меліоративній практиці?*

### 3. ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

#### 3.1. Оптимальні умови для розвитку сільськогос- подарських культур

За даними багаторічних досліджень (ДБН В.2.4-1-99) оптимальний режим зволоження ґрунту знаходиться в межах від найменшої вологоємкості до передполивної (критичної) вологості або нижньої межі оптимальної вологості.

*Найменша вологоємкість ґрунту (НВ)* – кількість вологи, яку може утримувати ґрунт у завислому стані, тобто та кількість вологи, яка залишається в ґрунті після стікання гравітаційної води під дією сили тяжіння. Інколи її називають – *польова вологоємкість (ПВ)*.

Найменша вологоємкість залежить, в першу чергу, від гранулометричного складу ґрунту для: піщаних ґрунтів НВ становить 4–10 % від маси сухого ґрунту, супіщаних – 10–20 %, легко- і середньосуглиннистих – 20–30 %, важкосуглиннистих і глинистих – 30–40 %.

*Допустима (критична, передполивна) вологість* – вологість ґрунту, при якій урожайність не понижується, вона рекомендована агрономічною наукою для різних сільськогосподарських культур з врахуванням природних особливостей окремих меліорованих ділянок.

Нажаль, в жодному із дослідів не знайдена переломна точка, при якій врожайність понижується, тому існує багато думок, як призначити нижню межу оптимального рівня зволоженості.

Один із підходів встановлення нижньої граничної вологості ґрунту можна описати формулою

$$W_{кр} = \frac{W_{HB} + W_{BB}}{2}, \quad (3.1)$$

де  $W_{кр}$  – критичні запаси вологи в ґрунті (запаси вологи при передполивній вологості ґрунту);

$W_{HB}$  – запаси вологи в ґрунті при НВ;

$W_{BB}$  – запаси вологи ґрунту при вологості в'янення, непродуктивні запаси вологи в ґрунті, рівень вологості в ґрунті, при якому розпочинається стійке в'янення рослин.

О.А. Роде встановив, що передполивна вологість повинна відповідати *вологості розриву капілярних зв'язків (ВРКЗ)*. Як впливає з

самої назви, при ВРКЗ суцільність заповнення вологою шпарин порушується, волога різко втрачає свою рухомість і вже не може в значній кількості рухатись в зону споживання рослинами. О.А. Роде встановив, що вологість розриву капілярних зв'язків, складає приблизно 70-80 % від НВ даного ґрунту і є величиною постійною, що залежить, головним чином, від гранулометричного, агрегатного складу та від механічного складу ґрунту.

Агрометеорологи гідрометеослужби в практичній роботі та дослідженнях приймають

$$W_{ВРКЗ} = \frac{W_{HB} + W_{BB}}{2}. \quad (3.2)$$

Осереднені показники передполивної вологості ґрунту можна прийняти для:

- легких глин – 0,80–0,85 НВ;
- важких суглинків – 0,75–0,80 НВ;
- середніх суглинків – 0,70–0,75 НВ;
- легких суглинків – 0,65–0,70 НВ;
- супісків – 0,50–0,60 НВ.

Однак, як показали дослідження, не обов'язково протягом всього вегетаційного періоду підтримувати вказану межу зволоженості. В зв'язку з цим з'явився цілий ряд, так званих вологозберігаючих режимів зволоження, які передбачають зниження вологості ґрунту в окремі, менш відповідальні фази розвитку рослин.

Нестача води призводить до різних результатів залежно від фази розвитку рослин. У їх житті виділяють порівняно короткі періоди, протягом яких при недостатній кількості вологи особливо різко знижується врожайність, а достатнє водоспоживання забезпечує високий її рівень. Такі періоди в рослин вперше виявив відомий вчений П.І. Броунов і назвав їх *критичними* (Гун М.І., 1953).

Посуха особливо шкідливо впливає на молоді органи рослин, що знаходяться у фазі активного росту. Тому критичний період для рослин, як правило, припадає на час, коли початкову фазу росту і розвитку проходять органи, що визначають урожайність. У багатьох сільськогосподарських культур це репродуктивні органи – плоди і насіння. Природно, що критичні періоди нерідко спостерігаються перед квітуванням, або відразу ж після нього. У зв'язку з цим рослини пристосувались до того, щоб забезпечувати краще водоспоживання молодих репродуктивних органів. Критичні періоди основних сільськогосподарських культур настають у такі фази [Ушкаренко В.О., 1994]:

**Таблиця 3.1 – Критичні фази розвитку основних сільськогосподарських культур**

Сільськогосподарська культура	Критична фаза розвитку
Пшениця озима	вихід в трубку – колосіння – квітування – налив зерна
Ячмінь ярий	трубкування – налив зерна
Люцерна підкорова	відростання
Люцерна 2-го року	відростання
Соя	початок квітування – налив зерна
Просовидні (просо, сорго)	викидання волоті
Кукурудза на зерно	15-й листок – формування зерна
Бобові, гречка, гірчиця	квітування
Соняшник	утворення кошиків – квітування
Баштанні	квітування – дозрівання
Буряк	активний ріст коренеплодів
Картопля	квітування – формування бульб
Помідор	квітування – формування плодів
Капуста пізньостигла	зав'язування голівки – початок дозрівання
Огірок	початок масової появи жіночих квіток – плодоношення
Перець солодкий	квітування – плодоношення
Цибуля ріпчаста	початок утворення цибулин – формування цибулини
Баклажан	квітування – плодоношення

Причини різкого зниження врожаю при нестачі вологи в критичні періоди у різних рослин можуть бути різними. Так, за даними вітчизняних вчених, у ярих хлібів у цей період може пошкоджуватись пилок у пиляках, що призводить до череззерниці та появи пустих колосків. У рослин, урожай яких становлять вегетативні органи, критичною з виробничої точки зору є фаза активного росту таких органів. Для буряка цукрового це період активного росту коренеплодів, а для картоплі – бульб і т.д.

Оптимальний рівень передполивної вологості значною мірою залежить від клімату і погоди. Чим сухіше повітря і жаркіша погода, тим більше повинне бути водопостачання рослин, щоб при посиленій транспірації підтримати на необхідному рівні вміст води в листі та інших органах і забезпечити потрібний темп і напрямок біохімічних та фізіологічних процесів. Тому в умовах більш вологого і прохолодного клімату, як правило, передполивна вологість характеризується

відносно низьким показником, а в посушливі роки рекомендується прийняті показники збільшувати на 5–10 % відносно НВ.

В додатку А наведені граничні значення зволоження ґрунту в різні фази розвитку основних сільськогосподарських культур регламентовані (ДБН В.2.4-1-99, 2000).

### **3.2. Глибина активного кореневмісного шару ґрунту**

Для встановлення режиму зрошення поряд з рівнем передполивної вологості необхідно знати *глибину зволоженого шару ґрунту*, що містить активний шар і в якому розташована основна маса всмоктуючих коренів. О.М. Костяков встановив, що ця глибина для різних культур коливається від 0,4 до 1,0 м.

У дослідях з вивчення режимів зрошення сільськогосподарських культур проведених на півдні України, були виділені три групи рослин, що відрізняються глибиною розповсюдження основної маси коріння:

- культури з малопотужною кореневою системою (основна маса коріння на глибині до 30–50 см) – більшість овочевих культур, картопля, злакові багаторічні трави та ін.;
- культури з середньою потужністю кореневої системи (40–80 см) – зернові, кормові культури, кукурудза, сорго, соя та ін.;
- культури з глибоко проникаючою кореневою системою (80–100 см) – люцерна, коренеплоди, соняшник.

Активний шар змінюється з ростом кореневої системи. Спостерігається значний вплив зрошення на розміри і розміщення кореневої системи за шарами ґрунту. Маса коріння при зрошенні збільшується і розміщується переважно в тому шарі, який зволожується поливами.

У початковий період вегетації і формування кореневої системи активний її шар може бути невеликий, але зволожувати поливами потрібно весь шар, який відповідає мінімальній поливній нормі, допустимій при даному способі і технічних умовах поливу.

При поливі дощуванням поливна норма, у більшості випадків, може бути як завгодно мала. Але й при таких умовах зволожувати поливами потрібно шар ґрунту не менше 30-40 см, оскільки вологість поверхневих шарів надто нестійка, вода швидко витрачається на випаровування, слабо використовується кореневою системою.

У додатку А наведена глибина розповсюдження кореневої системи в різні фази розвитку основних сільськогосподарських культур, регламентовані ДБН В.2.4-1-99 «Меліоративні системи і споруди».

При неглибокому заляганні рівнів ґрунтових вод, глибина зволоження шару не повинна перевищувати певної межі, яка визначається нерівністю

$$H_p < H_{кз} + H_{зв} \quad (3.3)$$

де  $H_p$  – глибина зрошуваного (розрахункового) шару ґрунту, м;

$H_{кз}$  – висота шару капілярного зволоження (капілярна зона), м;

$H_{зв}$  – глибина залягання ґрунтових вод, м.

Отже, зрошуваний шар разом з шаром капілярної зони повинен бути менше глибини залягання ґрунтових вод, у протилежному разі зрошення викликає подальше їх підняття, і засолення кореневмісного шару ґрунту при наявності мінералізованих ґрунтових вод.

### **Приклад 3.1. Встановити межі оптимального зволоження ґрунту**

Дані водно-фізичні властивості ґрунту на агрометеорологічній станції Синельникове (розріз № 3 1960 р.). Ґрунт – чорнозем звичайний малогумусний, мулувато-крупнопилуватий, важкосуглинковий (табл. 3.1).

**Таблиця 3.1 – Водно-фізичні (агрофізичні) властивості ґрунту**

Шар ґрунту, см	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Вологість в'янення у % від маси ґрунту	Найменша вологоємність	Запаси вологи при НВ, мм		
				загальні	продуктивні	легкодоступні
0-10	1,07	11,4	29,8	31,9	19,7	9,8
10-20	1,14	11,5	29,7	33,9	20,7	10,4
20-30	1,16	11,1	26,6	30,9	18,0	9,0
30-40	1,23	12,0	24,8	30,5	15,7	7,9
40-50	1,26	11,6	23,7	29,9	15,2	7,6
50-60	1,29	11,8	22,6	29,2	13,9	7,0
60-70	1,38	11,9	22,5	31,1	14,6	7,3
70-80	1,39	11,8	22,8	31,7	15,3	7,6
80-90	1,39	11,7	22,8	31,7	15,4	7,7
90-100	1,35	12,0	22,6	30,5	14,3	7,2
0-30				96,6	58,4	29,2
0-50				157	89,4	44,7
0-80				249	133	66,6
0-100				311	163	81,5

Щільність ґрунту, вологість в'янення і найменша вологоємність у відсотках від маси сухого ґрунту, визначаються на підставі польових досліджень ґрунтового розрізу з інтервалом по 10 см.

Загальні запаси вологи при НВ за 10 см проміжки визначають за співвідношенням  $W_{заг} = \gamma \cdot \beta_{НВ} \cdot \text{мм}$ .

де  $\gamma$  – щільність 10-сантиметрового шару ґрунту, г/см<sup>3</sup>;

$\beta_{HB}$  – вологість 10-сантиметрового шару ґрунту при НВ, % від сухого ґрунту.

Продуктивні запаси вологи при НВ визначають як різницю між загальними запасами і непродуктивними запасами вологи  $W_{np} = \gamma \cdot (\beta_{HB} - \beta_{BB})$ , мм.

$\beta_{BB}$  – вологість 10-сантиметрового шару ґрунту при вологості стійкого в'янення, % від сухого ґрунту.

Легкодоступні запаси вологи при НВ визначають як  $\frac{1}{2}$  від продуктивних запасів вологи.

Знаючи запаси вологи для 10 см шарів ґрунту можна розрахувати запаси вологи для будь-якого активного кореневмісного шару будь-якої культури для будь-якої фази розвитку. В табл. 3.1 наведені запаси вологи для шару ґрунту 30, 50, 70 і 100 см шарів ґрунту.

Нижню межу зволоження для кожної сільськогосподарської культури в різні фази її розвитку виражають як частку від запасів вологи від НВ (див. додаток А). Так для кукурудзи в табл. 3.2 наведена нижня межа загальних запасів вологи для кореневмісного шару для різних фаз розвитку.

**Таблиця 3.2 – Нижня межа оптимального зволоження (загальні запаси вологи) кукурудзи в різні фази її розвитку**

Фенологічна фаза розвитку кукурудзи	Глибина активного кореневмісного шару ґрунту, см	Нижня допустима границя зволоженості ґрунту		Верхня межа зволоження при НВ, мм	Діапазон легкодоступної вологи, мм
		% НВ	мм		
Посів – сходи	50	75	118	157	39
5–7 листок	70	80	174	217	43
Викидання волоті	80	80	199	249	50
Молочна стиглість	80	75	187	249	60

### **3.3. Розрахункові схеми для визначення режиму зрошення сільськогосподарських культур**

Відомо, що метод встановлення строків поливу оснований на визначенні вологості ґрунту має багато способів, які розділяють на вимірювання запасів вологи і її розрахунку.

Способи, що вимірюють запаси вологи різними приладами застосовують в основному при оперативному встановленні строків поливу або визначенні початкових та контрольних вологозапасів при їх розрахунку. В розділі 13 (п.13.5) наведена класифікація і короткий опис інструментальних методів вимірювання запасів вологи.

При встановленні проєктних і експлуатаційних сезонних режимів зрошення застосовують розрахункові методи визначення запасів во-



логи, так як необхідно вести статистичну обробку природно-кліматичних умов досліджуваної території під певну забезпеченість. Найчастіше для розрахунку режиму зрошення застосовують водно-балансові методи, які порівнюють прихідну і витратну частини водного балансу досліджуваної території.

В практиці планування режимів зрошення, як правило, застосовують одну із двох розрахункових схем (формул).

**1. Розрахунок дефіциту водоспоживання** сільськогосподарських культур

$$D_i = E_i - P_i + \Delta P_i - W_{zp}, \quad (3.4)$$

де  $D_i$  – дефіцит водоспоживання сільськогосподарських культур за  $i$ -й період (добу, пентану, декаду);

$E_i$  – сумарне водоспоживання сільськогосподарською культурою (сумарне випаровування з сільськогосподарських полів);

$P_i$  – атмосферні опади;

$\Delta P_i$  – втрати атмосферних опадів на поверхневий стік та фільтрацію;

$W_{zp}$  – підживлення кореневмісного шару ґрунту ґрунтовими водами.

Всі складові водного балансу розраховуються в мм шару води або  $\text{м}^3/\text{га}$ .

**2. Розрахунок динаміки запасів вологи** в активному шарі ґрунту

$$W_i = W_{i-1} + P_i - \Delta P_i + W_{zp} - E_i + m_i, \quad (3.5)$$

де  $W_{i-1}$  та  $W_i$  – запаси вологи відповідно на початку та в кінці  $i$ -го періоду, мм або  $\text{м}^3/\text{га}$ ;

$m_i$  – поливна норма в розрахунковий період, мм або  $\text{м}^3/\text{га}$ .

Полівну норму  $m_i$  призначають в ті періоди, коли  $W_i$  опускається нижче межі оптимального зволоження ґрунту.

Першу розрахункову схему, що визначає дефіцит водоспоживання, як правило, застосовують при оцінці зволоженості року та при аналізі необхідності зрошення в цілому. Крім того цією схемою зручно користуватись при розрахунках проектних режимів зрошення ручним способом за вибраним роком відповідної забезпеченості.

Другу розрахункову модель використовують при розрахунках експлуатаційних режимів зрошення в поточному році. Цю схему частіше застосовують при програмуванні розрахунків на комп'ютері.

При правильному веденні розрахунків за обома схемами результати повинні бути однаковими, так як складаються з одних і тих же складових водного балансу.

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Яку приймають верхню межу оптимального зволоження рослин?*
- 2. Що називають найменшою вологоємністю ґрунту (НВ)?*
- 3. Що називають передполивною вологістю ґрунту? Які передумови її встановлення?*
- 4. Що таке вологість розриву капілярних зв'язків? Як її визначають?*
- 5. Які фази розвитку рослин є критичними? Як їх враховують при встановленні режимів зрошення сільськогосподарських культур?*
- 6. Як встановлюють глибину кореневмісного активного шару ґрунту для розрахунку режимів зрошення сільськогосподарських культур?*
- 7. Як впливає глибина залягання ґрунтових вод на встановлення глибини промочування ґрунту при розрахунку режимів зрошення?*
- 8. Які застосовують розрахункові схеми при встановленні режимів зрошення сільськогосподарських культур?*
- 9. Які складові водного балансу зрошуваних земель застосовують для розрахунку режимів зрошення сільськогосподарських культур?*

## 4. СУМАРНЕ ВОДОСПОЖИВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

*Сумарне водоспоживання* (сумарне випаровування, евапотранспірація) сільськогосподарським полем – це об'єм води, що витрачається полем на транспірацію рослинами та випаровування з поверхні ґрунту. Його вимірюють в м<sup>3</sup>/га або в мм шару води.

В меліоративній практиці його називають сумарне водоспоживання, в гідрологічних розрахунках застосовують термін сумарне випаровування, а в зарубіжній літературі застосовується термін евапотранспірація (E).

*Транспірація рослинами* – процес випаровування вологи з рослин в атмосферу з їх продихів при рості та розвитку. Кількість води, яка витрачається на транспірацію впливає на врожайність сільськогосподарських культур. Чим більше пройде води через рослини, тим більшим буде врожай.

*Випаровування з поверхні ґрунту* – фізичне випаровування з ґрунту незалежно від наявності рослин на ньому. Кількість води випарованої з поверхні ґрунту не впливає на врожай, тому це не корисне випаровування й існує цілий ряд агротехнічних прийомів по його зменшенню. Основні із них це руйнування ґрунтової кірки, яка утворюється після атмосферних опадів і поливів.

При розрахунку режимів зрошення часто не розділяють транспірацію рослинами і випаровування з поверхні ґрунту, а визначають сумарне водоспоживання поля. Кількісно інтенсивність сумарного водоспоживання залежить від вологості ґрунту, фізіологічних властивостей рослин, метеорологічних умов та рівня агротехніки. При оптимальних запасах вологи в ґрунті водоспоживання залежить від стану рослинного покриву та термічного режиму зовнішнього середовища, тобто має біокліматичний характер. В багатьох методах розрахунку сумарного водоспоживання вологість ґрунту не враховується так як вважається, що поливами вона підтримується в оптимальних межах.

Для визначення сумарного водоспоживання в нашій країні та за кордоном широко застосовують непрямі (розрахункові) методи, що базуються на використанні рівнянь, які характеризують динаміку тепло- та вологообміну в системі ґрунт – рослина – атмосфера.

#### 4.1. Розрахунок сумарного водоспоживання методом О.М. Костякова

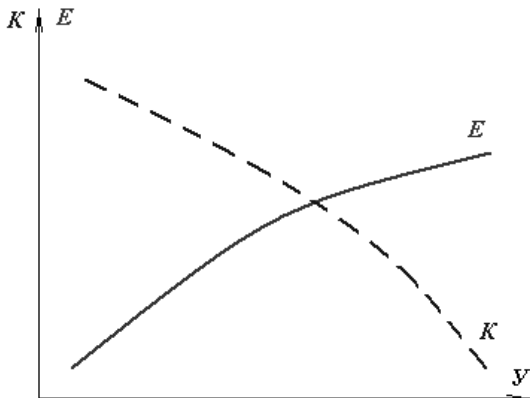
Загальну кількість води, що споживає поле, зайняте сільськогосподарською культурою, О.М. Костяков запропонував визначати за формулою

$$E = K \cdot Y \quad (4.1)$$

де  $Y$  – проєктна (розрахункова) урожайність даної сільськогосподарської культури, ц/га або т/га;

$K$  – коефіцієнт споживання води ( $\text{м}^3/\text{ц}$  або  $\text{м}^3/\text{т}$ ) цієї ж культурою, що відповідає певним умовам середовища розвитку рослин – кліматичним умовам, рівню родючості ґрунту, агротехніці та врожайності – і отриманий на підставі дослідних даних.

Величина  $K$  – споживання води на одиницю врожаю, при даних кліматичних умовах – зменшується з підвищенням родючості ґрунту, збільшенням врожайності; чим вище родючість ґрунту, кращі умови живлення рослин, краща агротехніка, чим вища врожайність та краща структура ґрунту, тим менше споживання води на одиницю врожаю (рис. 4.1). Це впливає із закону незмінності факторів життя рослин (закон мінімуму).



**Рисунок 4.1** – Залежність врожайності й коефіцієнта водоспоживання від родючості ґрунту

Для попередніх розрахунків водоспоживання можна скористатись наведеними в табл. 4.1 значеннями  $K$ , які отримані та осереднені для степової зони України.

**Таблиця 4.1 – Коефіцієнти водоспоживання ( $K$ ) основних сільськогосподарських культур при зрошенні в степовій зоні України**

Сільськогосподарська культура	Коефіцієнт водоспоживання, м <sup>3</sup> /т	
	коливання за роками	в середньому
Пшениця на зерно	637-817	700
Кукурудза на зерно:		
середньопізня та пізньостигла	460-641	530
середньорання та середньостигла	307-548	420
Люцерна під покрив кукурудзи на з/к	53-111	70
Люцерна в рік сівби після збирання покривної культури (сіно)	572-688	630
Люцерна другого року вегетації (сіно)	409-576	470
третього року (сіно)	355-506	420
Кукурудза на силос	44-68	50
Буряк кормовий	33-45	40
Буряк цукровий	89-142	90
Соя	1269-1584	1470
Картопля ранньої посадки	91-176	130
Помідор розсадний	62-74	70
Помідор посівний	70-95	81
Огірок	88-112	100
Капуста пізня	76-91	90
Цибуля	69-99	80
Пожнивні на зелений корм: кукурудза	375-441	400
горохо-вівсяна суміш	568-727	660

Отже, з підвищенням родючості ґрунту та збільшенням врожаїв величина  $E$  зростає не пропорційно росту урожайності, а повільніше.

Результати досліджень показують, що одне і те ж сумарне водоспоживання в умовах високої родючості ґрунту при добрій агротехніці забезпечує значно більші врожаї, ніж в умовах низької родючості ґрунту. Крім того величина  $K$  змінюється із року в рік на одному і тому ж полі та при вирощуванні однієї і тієї ж культури залежно від погодних умов. Так, в більш вологі роки величина коефіцієнта  $K$  значно менше, ніж в посушливі роки.

**Приклад 4.1.** Розрахувати сумарне водоспоживання пшениці озимої за вегетацію, якщо планова врожайність 60 ц/га.

Коефіцієнт водоспоживання в середньому для пшениці озимої (див. табл. 4.1) складає 700 м<sup>3</sup>/т або 70 м<sup>3</sup>/ц, тоді відповідно до формули (4.1)  $E = 70 \cdot 60 = 4200$  м<sup>3</sup>/га.

Поряд з коефіцієнтом водоспоживання в агрономії застосовують термін транспіраційний коефіцієнт.

*Транспіраційний коефіцієнт* – відношення маси вологи, всмоктаної рослинами, пройденої через них та випаруваної в атмосферу, до маси сухої речовини рослин, що утворилась за вегетацію. Якщо, наприклад, до врожаю пшениці озимої входить тільки маса зерна, то маса сухої речовини включає масу висушеного зерна, колоска (полова), стебел (солома) і масу коріння. Маса води, що проходить через рослини, перевищує масу сухої рослини в 200–1000 разів і більше залежно від виду рослин, погодних та ґрунтових умов. Транспіраційний коефіцієнт змінюється в широких межах і складає:

- для пшениці – 350–750;
- жита – 380–750;
- кукурудзи – 300–400;
- картоплі – 300 – 600;
- люцерни – 500 – 1200.

## **4.2. Розрахунок сумарного водоспоживання біокліматичним метод А.М. та С.М. Алпатьєвих**

Метод застосовують для обчислення сумарного випаровування із зрошуваних полів в період вегетації при ступені зволоження кореневої частини шару ґрунту не нижче 65 % від НВ. Метод враховує біологічні особливості сільськогосподарських культур в різні періоди їх росту і розвитку.

Розрахунок випаровування здійснюють за формулою

$$E = k_{\sigma} \sum d, \quad (4.2)$$

де  $E$  – сумарне випаровування, мм;

$k_{\sigma}$  – біологічний коефіцієнт випаровування, що змінюється за характерною для кожного виду рослин кривою;

$\sum d$  – сума середніх добових дефіцитів вологості повітря за період (мб) на висоті 2,0 м.

Значення біологічного коефіцієнта отримують на підставі визначеного водоспоживання ( $E$ ) сільськогосподарських культур за окремі періоди їх росту та розвитку при підтримці оптимального зволоження шляхом зрошення

$$k_{\sigma} = \frac{E_e}{\sum d}, \quad (4.3)$$

де  $E_e$  – водоспоживання за будь-який розглянутий період часу (наприклад, за декаду). Визначають експериментальним шляхом, на підставі воднобалансових розрахунків, мм;

$\sum d$  – сума добових дефіцитів вологості повітря за той же період, мб.

Величина  $k_\delta$  змінюється для різних культур і навіть для однієї і тієї ж культури в дуже великих межах. Тому, рекомендується визначати ці коефіцієнти для всіх культур в даній ґрунтово-кліматичній зоні.

Коефіцієнти  $k_\delta$  змінюються протягом вегетації залежно від фенологічних фаз розвитку (додаток Г), для зручності, біологічну криву виражають у вигляді функції від суми середньодобових температур дати початку вегетації  $k_\delta = f(\sum t)$ , так як розвиток сільськогосподарських культур залежить від величини надходження тепла.

При відсутності в тій чи іншій зоні зрошувального землеробства відомостей про величину біологічного коефіцієнту можна для наближених розрахунків користуватись значеннями  $k_\delta$ , отриманими для середніх умов України, з введенням поправки на суму середньодобових температур на тривалість світлового дня в даній зоні. Для визначення приведених сум ( $\sum t_{np}$ ) значення  $\sum t$  необхідно помножити на коефіцієнт  $b$  для приведення температур повітря до 12-годинної тривалості дня залежно від широти місцевості та періоду року (додаток В).

До появи сходів коефіцієнт  $k_\delta$  приймають рівним 0,15 при відсутності атмосферних опадів та 0,19 при частих опадах.

Використовуючи знайдені значення  $k_\delta$  та  $\sum d$ , за формулою (4.2) розраховують випаровування за певний період. При розрахунку сумарного випаровування цим методом необхідно враховувати капілярний приплив та безпосереднє використання вологи корінням із шарів, що розташовані нижче розрахункового шару ґрунту. Цей вологообмін враховується введенням поправочного коефіцієнту  $k_g$ , який при глибокому заляганні рівня ґрунтових вод ( $H > 3$  м) приймають рівним для культур весняного посіву в першу четверть вегетації 1, в другу – 0,95, в третю – 0,90 та в четверту – 0,85. Для озимих культур в першу третину періоду, від весняного відновлення вегетації до кінця наливу зерна, другу та третю коефіцієнт  $k_g$  приймають відповідно рівними 0,95, 0,90 та 0,85. Для багаторічних трав минулих років протягом

всього періоду вегетації  $k_g = 0,85$ . Це пояснюється тим, що в початковій фазі розвитку всі корені знаходяться в розрахунковому шарі, а далі вони проникають все глибше.

Крім того при зрошуванні утворюється мікрокліматичний ефект, який пом'якшує екстремальні погодні умови (підвищує вологість і зменшує температуру повітря). Для врахування цього ефекту використовують поправочний коефіцієнт на мікроклімат ( $k_m$ , табл. 4.2).

**Таблиця 4.2 – Значення  $k_m$**

Зона	Місяць						Середній за вегетацію
	04	05	06	07	08	09	
Лісостепова	1	1	0,99	0,98	0,98	0,96	0,98
Степова	1	0,97	0,95	0,93	0,90	0,90	0,94

**Приклад 4.2 – Розрахувати сумарне водоспоживання пшениці озимої біокліматичним методом А.М. і С.М. Алпатьєвих в другу декаду травня (фаза розвитку вихід в трубку, біокліматичний коефіцієнт 0,53), середній дефіцит вологості повітря за декаду складає 14,6 мб.**

Сума середніх добових дефіцитів вологості повітря за декаду складе

$$\sum d = 14,6 \cdot 10 = 146 \text{ мб.}$$

Сумарне водоспоживання згідно формули (4.2) складатиме

$$E = 146 \cdot 0,53 = 77,38 \text{ мм.}$$

При розрахунку сумарного водоспоживання крім того необхідно враховувати коефіцієнт вологообміну з нижче розташованими шарами (для пшениці озимої в перші фази розвитку він складає 0,95) і мікрокліматичний коефіцієнт (для степової зони в травні він складає 0,97, див. табл. 4.2).

Тоді,  $E = 77,38 \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 71,3 \text{ мм.}$

### 4.3. Удосконалений біокліматичний метод В.П. Остапчика

В.П. Остапчик в подальшому розробив та удосконалив біокліматичний метод розрахунку водоспоживання. Він запропонував сумарне випаровування розраховувати окремо: випаровування з оголеного ґрунту  $E_2$  та випаровування з частини поля, що покрита рослинами  $E_6$  (Остапчик В.П., 2001).

Розрахунок сумарного водоспоживання  $E$  за удосконаленим біокліматичним методом здійснюють за формулою

$$E = \varphi \cdot E_6 + (1 - \varphi) \cdot E_2, \quad (4.4)$$



де  $\varphi$  – характеристика ступеня проектного покриття поля рослинами,

що визначається із відношення  $\varphi = \frac{a_n}{a_n^{KP}}$ , в якому  $a_n$  та  $a_n^{KP}$  – від-

повідно поточна та критична ступінь покриття поля рослинами.

Розрахунок випаровування  $E_\delta$  з ділянки поля, що покрита рослинами, при  $a_n < a_n^{KP}$  та зі всього поля  $E$  при  $a_n \geq a_n^{KP}$  виконують за формулою

$$E_\delta = k_\delta \cdot E_e, \quad (4.5)$$

де  $E_e$  – суми випаровування з водної поверхні випаровувача ГГИ-3000;

$k_\delta$  – біокліматичний коефіцієнт сумарного випаровування, що змінюється за фазами розвитку рослин за специфічною для кожної культури кривою.

На початку вегетації культур коефіцієнт  $k_\delta$  менше 1,0, в період найбільшої фізіологічної активності рослин  $k_\delta$  збільшується до 1,1–1,2, а потім знову зменшується зі старінням рослин.

Біокліматичні коефіцієнти для розрахунку водоспоживання основними сільськогосподарськими рослинами наведені в додатку Д. Остапчик В.П. як і С.М. Алпатьєв привів ці коефіцієнти до суми середньодобових температур від дати початку вегетації. Тут він привів для кожної фази розвитку глибину кореневмісного шару ( $h$ , м) і ступінь покриття рослинами поверхні ґрунту ( $\varphi$ ).

Випаровування з поверхні ґрунту  $E_2$ , що суттєве до покриття поля рослинами на 60 % ( $a_n \approx 0,6$ ), змінюється залежно від погодних умов, властивостей та стану поверхні ґрунту – насамперед від його зволоженості.

В період, одразу після випадіння атмосферних опадів та поливу проходить миттєве збільшення  $E_2$ . В подальшому цей процес затухає і досягає якогось мінімального стабільного значення при сухій поверхні ґрунту.

Цикл збільшення звичайно триває три дні, а в вологу погоду – чотири. За даними спостережень отримані рівняння регресії, що зв'язують добові суми випаровування з ґрунту з сумами випаровування з водної поверхні ГГИ-3000  $E_e$ .

$$E_2^c = 0,14E_e + 0,39, \quad (4.6)$$

$$E_2^1 = 0,94E_6 - 0,44, \quad (4.7)$$

$$E_2^2 = 0,60E_6 - 0,19, \quad (4.8)$$

$$E_2^3 = 0,49E_6 - 0,10, \quad (4.9)$$

де  $E_2^c$  – випаровування з поверхні сухого ґрунту;

$E_2^1, E_2^2, E_2^3$  – випаровування з поверхні ґрунту після випадіння атмосферних опадів або поливів відповідно через 1, 2 та 3 дні.

В день випадіння дощу або проведення поливу сума випаровування залежить від часу доби зволоження ґрунту – вранці, в середині дня чи увечері. Для спрощення допускається, що зволоження відбувається завжди в полудень

$$E_2^0 = 0,5(E_2^\tau + E_2^1), \quad (4.10)$$

де  $E_2^\tau$  – випаровування з поверхні ґрунту, що залежить від дня випадіння опадів –  $E_2^1, E_2^2, E_2^3$  чи  $E_2^c$ .

При розрахунку випаровування  $E_2$  за декадні періоди використовують формулу

$$E_2 = E_6(0,328 + 0,01P + 0,04N_p), \quad (4.11)$$

де  $P$  – сума атмосферних опадів за декаду, мм;

$N_p$  – кількість днів за декаду з опадами більше 1 мм.

Випаровування з водної поверхні випаровувача ГГИ-3000  $E_6$  рекомендується використовувати за даними найближчого метеопоста. Однак, мережа випаровувачів ГГИ-3000 недостатня для задоволення потреб зрошуваного землеробства, тому його значення можна знайти за регіональною формулою або прийняти як випаровуваність  $E_0$  розраховану за формулою М.М. Іванова.

**Приклад 4.3.** Розрахувати сумарне водоспоживання ячменю ярого удосконаленим біокліматичним методом В.П. Остапчика в другу декаду травня (середня за декаду температура повітря – 15,9 °С, відносна вологість повітря – 57,2 %, фаза розвитку ячменя – трубкування).

Випаровування з випаровувача ГГИ-3000 невідомо, тому тут краще скористатись розрахунком випаровуваності за формулою М.М. Іванова за декадний період

$$E_0 = 0,06 \cdot (15,9 + 25)^2 \cdot \left(1 - \frac{57,2}{100}\right) = 43,0 \text{ мм.}$$

Біокліматичний коефіцієнт в період трубкування дорівнює 1,10 (див. додаток Д), характеристика ступеня проєктного покриття  $\phi = 1$ .

Випаровування з ділянки поля, що покрита рослинами згідно формули (4.5) складе  $E_{\bar{\sigma}} = 1,10 \cdot 43,0 = 47,3$  мм.

Так як характеристика ступеня проектного покриття поля рослинами  $\varphi = 1$ , то можна випаровуванням з поверхні поля не покритої рослинами знехтувати і вважати, що сумарне водоспоживання складається тільки із випаровування рослинами тобто  $E = E_{\bar{\sigma}} = 47,3$  мм.

#### 4.4. Біофізичний метод Д.А. Штойко

Біофізичний метод Українського науково-дослідного інституту зрошувального землеробства, розроблений Д.А. Штойко, дозволяє визначати строки та норми поливів за температурою та відносною вологістю повітря. Цей метод Д.А. Штойко рекомендує застосовувати з урахуванням таких умов:

- зрошення легко- середньо- та важкосуглинкових чорноземів південних та каштанових ґрунтів;
- вологість в розрахунковому шарі важкосуглинкових ґрунтів підтримується на рівні не нижче 80 % від НВ, а на легко- та середньосуглинкових – 70–75 % від НВ;
- поливні норми при цьому в розрахунковому шарі 0,7 м повинні складати від 400 до 600 м<sup>3</sup>/га.

Для розрахунку використовують дві емпіричні формули

$$E = \sum t \cdot \left( 0,1 \cdot t_c - \frac{a}{100} \right), \quad (4.12)$$

$$E = \sum t \cdot \left( 0,1 \cdot t_c + 1 - \frac{a}{100} \right), \quad (4.13)$$

де  $E$  – сумарне випаровування за будь-який період (добу, декаду і т.д.), м<sup>3</sup>/га;

$\sum t$  – сума середньодобових температур за період, °С;

$t_c$  – середня температура повітря за цей же період, °С;

$a$  – середня відносна вологість повітря за період, %.

Першу формулу застосовують від сівби (відновлення вегетації) до повного затінення рослинами поверхні ґрунту та з моменту початку дозрівання (початку пожовтіння листя).

Другу формулу застосовують в період від повного затінення поверхні ґрунту до початку дозрівання, тобто в період найбільшої вегетативної активності рослин.

Наприклад: для кукурудзи першу формулу застосовують від сходів до утворення 12–14 листків та після молочної стиглості; другу

формулу застосовують в період від утворення 12–14-го листка до молочної стиглості.

**Приклад 4.4.** Розрахувати сумарне водоспоживання кукурудзи біофізичним методом Д.А. Штойко в другу декаду липня (середня за декаду температура повітря – +21,5 °С, відносна вологість повітря – 56,6 %, фаза розвитку – викидання волоті).

Так як кукурудза знаходиться в фазі активного розвитку сумарне водоспоживання необхідно визначати за формулою (4.13)

$$E = 215 \cdot \left( 0,1 \cdot 21,5 + 1 - \frac{56,6}{100} \right) = 556 \text{ м}^3/\text{га}.$$

## 4.5. Комплексний (тепловоднобалансовий) метод С.І. Харченко

Комплексний (тепловоднобалансовий) метод дозволяє визначати випаровування зі зрошуваних сільськогосподарських полів за місячні та міжфазні періоди окремих років при різному ступені зволоження ґрунту (від вологості в'янення до повної вологості) та при різних способах поливу.

Розрахунок місячних значень випаровування за теплий період року визначають за формулою

$$E = \beta \cdot E_0 \frac{\omega_1 + \omega_2}{2\gamma}, \quad (4.14)$$

де  $E$  та  $E_0$  – випаровування та випаровуваність з поля, мм;

$\beta$  – параметр, що враховує фази розвитку рослин;

$\omega_1$  та  $\omega_2$  – запаси продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту на початку та вкінці розрахункового періоду, мм;

$\gamma$  – вільна шпаруватість шару ґрунту, що чисельно дорівнює

$$\gamma = \omega_{HB} - \omega_{BB}, \quad (4.15)$$

де  $\omega_{HB}$  та  $\omega_{BB}$  – запаси вологи в метровому шарі ґрунту відповідно при найменшій вологості та вологості в'янення.

При  $\omega_1 = \omega_2 = \gamma$  отримуємо

$$E = \beta \cdot E_0. \quad (4.16)$$

Запаси продуктивної вологи для кінця розрахункового періоду визначають за формулою

$$\omega_2 = \frac{S}{f} = \frac{\omega_1 \left( 1 - \frac{\beta \cdot E_0}{2\gamma} \right) + P + M + W_{zp}}{1 + \frac{\beta \cdot E_0}{2\gamma}}, \quad (4.17)$$

де  $S = \omega_1 \cdot c + P + M + W_{zp}$ ;  $c = 1 - \frac{\beta \cdot E_0}{2\gamma}$ ;  $f = 1 + \frac{\beta \cdot E_0}{2\gamma}$ ;

$P$  – суми атмосферних опадів за розрахунковий період, мм;

$M$  – зрошувальна вода, що надходить протягом розрахункового періоду безпосередньо на поле при поливі, мм;

$W_{zp}$  – живлення ґрунтовими водами в зону аерації (капілярне живлення), мм.

*Випаровуваність*  $E_0$  – величина, що характеризує максимально можливе (не обмежене запасами вологи) випаровування з поверхні зволоженого ґрунту при певних метеорологічних умовах. Величина випаровуваності залежить від погодних умов, насамперед – від забезпеченості території вологою та теплом. Для визначення випаровуваності розроблено дуже багато методів розрахунку з використанням різних параметрів тепло- та вологозабезпеченості.

У комплексному методі визначення сумарного випаровування  $E_0$  для розрахункового періоду визначають за допомогою графіків, розроблених М.І. Будико, залежно від геоботанічних зон та значень дефіцитів вологості повітря (рис. 4.2).

Вперше фізичне обґрунтування випаровуваності, як максимально можливого випаровування було зроблене М.І. Будико, при цьому досліджувана величина характеризувалася як еквівалент радіаційного балансу зволоженої поверхні

$$E_0 = \frac{R_0}{0,1L}, \quad (4.18)$$

де  $R_0$  – радіаційний баланс зволоженої поверхні, ккал/см<sup>2</sup>/рік

$L$  – прихована теплота пароутворення, ккал/г.

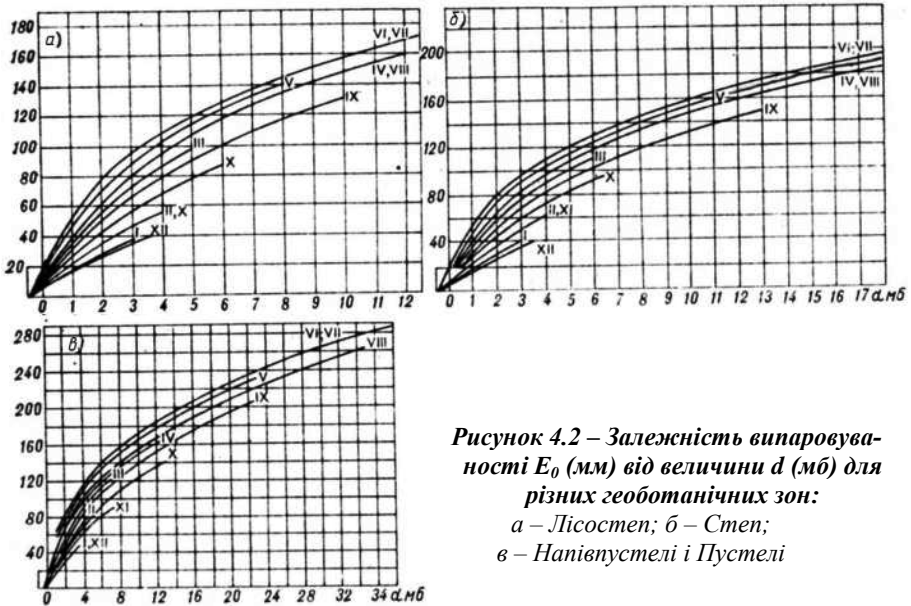
Для визначення випаровуваності за внутрішньорічні періоди М.І. Будико запропонував комплексний метод розрахунку

$$E_0 = \rho \cdot D(q_s - q), \quad (4.19)$$

де  $\rho$  – щільність повітря;

$D$  – інтегральна характеристика турбулентного обміну;

$q_s$  – питома вологість насичення водяним паром повітря при температурі випарної поверхні, мб;  
 $q$  – питома вологість повітря, мб.



**Рисунок 4.2 – Залежність випаровуваності  $E_0$  (мм) від величини  $d$  (мб) для різних геоботанічних зон:**  
*a* – Лісостеп; *б* – Степ;  
*в* – Напівпустелі і Пустелі

Важко визначуваними параметрами в комплексному методі є  $D$  і  $q_s$ . Як правило, при вирішенні практичних задач коефіцієнт дифузії приймають постійним, зазвичай для теплого сезону рівним 0,63 см/с. Подібне спрощення порушує теоретичну суворість комплексного методу. Величина  $q_s$  визначається із рівняння теплового балансу зволоженої поверхні.

Для спрощення розрахунків випаровуваності Л.І. Зубенко рівняння (4.19) представив таким чином

$$E_0 = pD(q_s - q'_s) + (q'_s - q_s), \quad (4.20)$$

де  $q'_s$  – питома вологість повітря, насичена при його температурі, мб.

$pD(q_s - q'_s)$  – зазвичай називають випаровуваністю, визначеною за дефіцитом вологості повітря. Другий доданок формули (4.20) складає поправку до першого, яка виникає внаслідок нерівномірності температур повітря і випаровуючої поверхні.

Будучи теоретично обґрунтованим, комплексний метод має ті недоліки, що при визначенні радіаційного балансу зволоженої поверхні в посушливих районах одностороннє враховують вплив зволоження на основні кліматичні фактори, а саме: значення альbedo приймається рівним 0,18 (умова зімкнутого травостою і достатнього зволоження), а значення температури і абсолютної вологості повітря приймають за даними вимірювань метеостанцій, тобто за умови природного зволоження.

Аналізуючи рівняння (4.19), яке визначає величину потоку вологи від підстилаючої поверхні в атмосферу, А.І. Будаговський приходять до висновку про необхідність введення поправки  $\beta$ , яка обумовлена нерівномірністю нагрівання поверхні рослинного покриву. Формула А.І. Будаговського для розрахунку випаровуваності має вигляд

$$E_0 = pD(\beta \cdot q'_s - q_s). \quad (4.21)$$

Коефіцієнт  $\beta$  визначають за матеріалами балансових спостережень.

**Приклад 4.5.** Розрахувати сумарне водоспоживання кукурудзи комплексним (тепловоднобалансовим) методом в другу декаду липня (середній за декаду дефіцит вологості повітря – 11,6 мб, фаза розвитку – викидання волоті).

У відповідності до графіків залежності випаровуваності від величини середньомісячних дефіцитів вологості повітря для липня степової геоботанічної зони (див. рис. 4.2, б), випаровуваність складе 170 мм.

Якщо вважати, що запаси вологи підтримуються поливами в оптимальних межах, то сумарне випаровування можна визначити за формулою (4.16). Коефіцієнт  $\beta$  при активному рості і розвитку культури складе 1,15 (аналогічно біокліматичного коефіцієнта В.П. Остапчика). Тоді,  $E = 1,15 \cdot 170 = 195$  мм/місяць або 65,2 мм/декаду.

## 4.6. Визначення сумарного випаровування методом В.С. Мезенцева

Сумарне випаровування при методі розробленому В.С. Мезенцевим розраховують за формулою

$$E = V_0^r \cdot Z_m, \quad (4.22)$$

де  $Z_m$  – водний еквівалент випаровування, мм;

$V_0$  – необхідний для даної сільськогосподарської культури рівень оптимальної зволоженості, частка від НВ.

Для більшості сільськогосподарських культур  $V_{ВПКЗ} \leq V_0 \leq 1$ , де  $V_{ВПКЗ}$  – рівень зволоженості, що відповідає вологості розриву капілярних зв’язків.

$r$  – параметр, що залежить від водно-фізичних властивостей ґрунту ( $V_{ВПКЗ}$  та параметра  $n$ ).

**Таблиця 4.3 – Значення параметра  $r$**

Параметр $n$	Вологість розриву капілярних зв’язків $V_{ВПКЗ}$											
	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
2	1,19	1,32	1,40	1,50	1,62	1,75	1,91	2,13	2,43	2,90	3,45	4,00
2,5	1,14	1,24	1,32	1,40	1,52	1,64	1,80	2,00	2,30	2,75	3,36	3,95
3	1,10	1,18	1,24	1,32	1,41	1,52	1,69	1,89	2,17	2,60	3,27	3,90

$n$  – параметр, що залежить від ландшафтних умов формування поверхневого стоку.

Водний еквівалент  $Z_m$  визначають із рівняння теплового балансу

$$L \cdot Z_m = R - P - (B_1 - B_2), \quad (4.23)$$

де  $L \cdot Z_m$  – витрата тепла на випаровування;

$R$  – радіаційний баланс;

$P$  – турбулентний теплообмін (потік тепла від земної поверхні в атмосферу);

$B_1 - B_2$  – зміна вмісту тепла в ґрунті;

$L$  – скрита теплота випаровування.

Зі співвідношення  $Z_m = \frac{R - P - (B_1 - B_2)}{L}$  можна знайти  $Z_m$  за

будь-який період часу, якщо попередньо визначити інші складові теплового балансу.

Вважаючи, що опис складного процесу максимально можливого випаровування за аналогією процесу випаровування з водної поверхні в посушливих зонах може давати лише наближені до дійсності результати, В.С.Мезенцев визначає максимально можливе випаровування як еквівалент прихідних складових теплового балансу

$$LE_m = \sum R^+ + \sum P^+, \quad (4.24)$$

де  $\sum R^+$ ,  $\sum P^+$  – суми додатних складових радіаційного балансу і турбулентного теплообміну, кал/см<sup>2</sup>.

Рівняння (4.24) змінює існуючий погляд на процес максимально можливого випаровування. Виявляється у формуванні теплоенерге-



тичних ресурсів процесу сумарного випаровування, крім радіаційного балансу, бере участь турбулентний теплообмін, який стає вирішальним при малій величині радіаційного балансу. Це найбільш точно відображає процеси сумарного випаровування, які відбуваються в природі. Так, в зимові місяці, як правило,  $R < 0$ , і якщо теплоенергетичні ресурси розрахувати тільки з врахуванням радіаційного балансу, то  $E_m \rightarrow 0$ ,  $E \rightarrow 0$ , а випаровування спостерігається зі снігового покриття, і з поверхні льоду, тобто  $E_m > 0$  і  $E > 0$ ; випаровування в цьому випадку обумовлюється як турбулентним теплообміном, так і додатною складовою радіаційного балансу. При великих значеннях радіаційного балансу (літні місяці) величина турбулентного теплообміну незначна. Відношення додатної складової радіаційного балансу до однойменної сумарної величини за рік, згідно досліджень, виконаних в Омському сільськогосподарському інституті, коливається від 1,18 до 1,46.

Повертаючись до розглянутого вище комплексного методу визначення випаровуваності, необхідно відмітити, що відношення радіаційного балансу зволоженої поверхні до однойменної величини природної поверхні, за даними Н.А. Єфімової, коливається від 1,2 до 1,5. Це означає, що величини максимально можливого випаровування, розраховані за (4.18) і (4.24) відрізняються незначно.

Оскільки формула (4.24) теоретично обґрунтована з енергетичної точки зору, з її допомогою можна визначити максимально можливе випаровування як строго однозначну величину для заданих кліматичних умов.

Вимірювання складових частин пов'язано з деякими труднощами. Так, для вимірювання радіаційного балансу ( $R$ ) необхідно мати спеціальні прилади, що потребують ретельного догляду частих перевірок внаслідок недостатньо стабільних показань. Методика роботи з актинометричними приладами дуже складна і потребує спеціальної підготовки спостерігачів. Камеральна обробка матеріалів актинометричних спостережень – трудомістка за об'ємом, потребує спеціальної підготовки. В зв'язку з цим В.С. Мезенцев розробив декілька емпіричних формул для визначення  $Z_m$  за масовими метеорологічними характеристиками. Маючи суми середньодобових температур повітря більше  $+10^\circ\text{C}$  ( $\sum t_{>10}$ ) –  $Z_m$  за рік можна розрахувати за формулою

$$Z_m = 173 \frac{\sum t_{>10}}{1000} + 423. \quad (4.25)$$

За наявності середньомісячних температур повітря вище 0°C ( $\sum t_{\text{сер.м}>0}$ ) –  $Z_m$  за рік розраховують за формулою

$$Z_m = 5,1 \sum t_{\text{сер.м}>0} + 382. \quad (4.26)$$

Розподіл показника  $Z_m$  всередині року з достатньою точністю можна підрахувати пропорційно ходу дефіциту вологості повітря

$$Z_{m_i} = Z_m \frac{d_i}{\sum d_i}, \quad (4.27)$$

де  $d_i$  – середньомісячні (середньодекадні) дефіцити вологості повітря, мб;

$\sum d_i$  – сума середньомісячних (середньодекадних) дефіцитів вологості повітря за рік.

При цьому

$$Z_{m_i} = \frac{A}{d_p} \left( \frac{\sum t_{>10}}{1000} + 2,445 \right) \cdot d_i, \quad (4.28)$$

$$Z_{m_i} = \frac{A_1}{d_p} (\sum t_{\text{сер.м}>0} + 75,25) \cdot d_i, \quad (4.29)$$

де  $d_p$  – середній за рік дефіцит вологості повітря, мб;

$A$  та  $A_1$  – коефіцієнти пропорційності.

**Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнтів пропорційності  $A$  та  $A_1$**

Коефіцієнти	Для періоду			
	доба	декада	місяць	рік
$A$	0,48	4,8	14,4	173
$A_1$	0,0142	0,142	0,425	5,10

Існує і ряд інших емпіричних формул для обчислення  $Z_m$ .

Параметр  $n$ , що залежить від ландшафтних умов формування стоку, визначають з рівняння зв'язку

$$n = \frac{-0,301}{\lg\left(1 - \frac{Y_0}{H_0}\right)} = \frac{-0,301}{\lg(1 - \eta_0)}, \quad (4.30)$$

де  $Y_0$  – оптимальний сумарний стік;

$H_0$  – загальна кількість води, що необхідна для забезпечення оптимального зволоження

$$H_0 = P + W_{ep} + M, \quad (4.31)$$

$P$  – атмосферні опади, мм;

$W_{ep}$  – підживлення ґрунтовими водами зони аерації, мм;

$M$  – зрошувальна вода, що необхідна для підтримки оптимального зволоження, мм;

$\eta_0$  – коефіцієнт стоку.

Параметр  $n$  є функцією коефіцієнту стоку  $\eta_0$  при умові повної відповідності ресурсів зволоження та теплозабезпечення даного ландшафту. Очевидно, що коефіцієнт  $\eta_0$  в горах більше, ніж на рівнині. Отже, на рівнині на випаровування вологи йде більше.

В.С. Мезенцев підрахував величини  $n$  та  $\eta_0$  для всіх основних басейнів річок земної кулі. Так, для басейну річки Дніпро  $n=3,10$  при  $\eta_0=0,20$ .

**Приклад 4.6.** Розрахувати сумарне водоспоживання методом В.С. Мезенцева за даними метеостанції Синельникове в середній за зволоженістю рік.

Так як немає даних спостережень теплового балансу за даною метеостанцією водний еквівалент випаровування  $Z_m$  можна визначити за наближеними емпіричними формулами (4.25) або (4.26), які використовують температуру повітря.

Сума середньодобових температур повітря більше  $+10$  °С для умов метеостанції Синельникове складає 3002 °С (середні багаторічні значення). Згідно формули (4.25)

$$Z_m = 173 \frac{3002}{1000} + 423 = 942 \text{ мм.}$$

Сума середньомісячних температур повітря вище  $0$  °С для умов Синельникове в середньому багаторічному складає 112,6 °С тоді згідно формули (4.26)

$$Z_m = 5,1 \cdot 112,6 + 382 = 956 \text{ мм.}$$

Обидві формули дають приблизно однакові значення, для подальших розрахунків можна прийняти середнє значення  $Z_m = \frac{942 + 956}{2} = 949$  мм.

Знаючи середні місячні дефіцити можна розрахувати значення водного еквівалента випаровування  $Z_m$  за місяці, а також сумарне випаровування за ці ж місяці (табл. 4.5)

Якщо прийняти для басейну Дніпра  $n = 3$ ,  $V_{ВРКЗ} = 0,75$ , тоді  $r = 2,17$ .

Необхідний для даної сільськогосподарської культури рівень оптимальної зволоженості  $V_0$  коливається в межах  $V_{ВЗКЗ} \leq V_0 \leq 1$ , в середньому 0,875 частка від НВ. Тоді можна за формулою (4.22) розрахувати сумарне водоспоживання за місяці року (див. табл. 4.5). Аналогічним чином можна розрахувати ці величини за декади або навіть доби будь-якого року.

**Таблиця 4.5 – Розрахунок сумарного випаровування методом В.С. Мезенцева**

Параметр	Місяць												За рік
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Дефіцит вологості повітря, мб	0,6	0,8	1,6	4,9	8,5	10,0	11,4	12,1	7,4	3,3	1,1	0,6	62,3
$Z_m$	9,1	12,2	24,4	74,6	130	152	174	184	113	50,3	16,8	9,1	949
Сумарне водоспоживання $E$ , мм	6,8	9,1	18,2	55,9	96,9	114	130	138	84,4	37,6	12,5	6,8	710

#### **4.7. Визначення сумарного випаровування методом О.Р. Костянтинова**

Розрахунок інтенсивності випаровування О.Р. Костянтинов запропонував здійснювати за встановленою ним закономірністю переміщення водного пару в приземному шарі атмосфери.

Розрахункова залежність має вигляд

$$E = \rho \cdot k \frac{\partial e}{\partial z}, \quad (4.32)$$

де  $E$  – інтенсивність випаровування, або потік водного пару;

$\rho$  – густина повітря;

$k$  – коефіцієнт турбулентного обміну;

$\frac{\partial e}{\partial z}$  – градієнт зміни вмісту водяного пару з висотою.

Для кінцевого інтервалу висоти  $\Delta z = z_1 - z_2$  градієнт вологості – це різниця між значеннями абсолютної вологості на двох рівнях –  $z_1$  та  $z_2$ .

Для визначення коефіцієнта турбулентного обміну  $k$  необхідно знати зміну швидкості вітру  $\Delta u$  та температури  $\Delta t$  мінімум на двох рівнях.

Отже, для розрахунку випаровування методом турбулентної дифузії необхідно мати дані вимірювань швидкості вітру, температури та вологості повітря як мінімум на двох рівнях. На метеорологічних станціях ці елементи вимірюють тільки на одній висоті. В зв'язку з цим О.Р. Костянтинов розробив методику розрахунку сумарного випаровування методом турбулентної дифузії з використанням даних метеорологічних станцій.

Вказуючи на необхідність використання біологічних кривих водоспоживання при визначенні сумарного випаровування і основую-

чись на методі турбулентної дифузії, О.Р. Костянтинов наводить рівняння для визначення сумарного випаровування у вигляді

$$E = 0,086\gamma \cdot a_c \cdot v_{1,0}(l_{0,5} - l_{2,0}), \quad (4.33)$$

де  $E$  – сумарне випаровування, мм/год.;

$\gamma$  і  $a_c$  – параметри за температурною стратифікацією атмосфери;

$v_{1,0}$  – швидкість вітру на висоті 1,0 м, м/с;

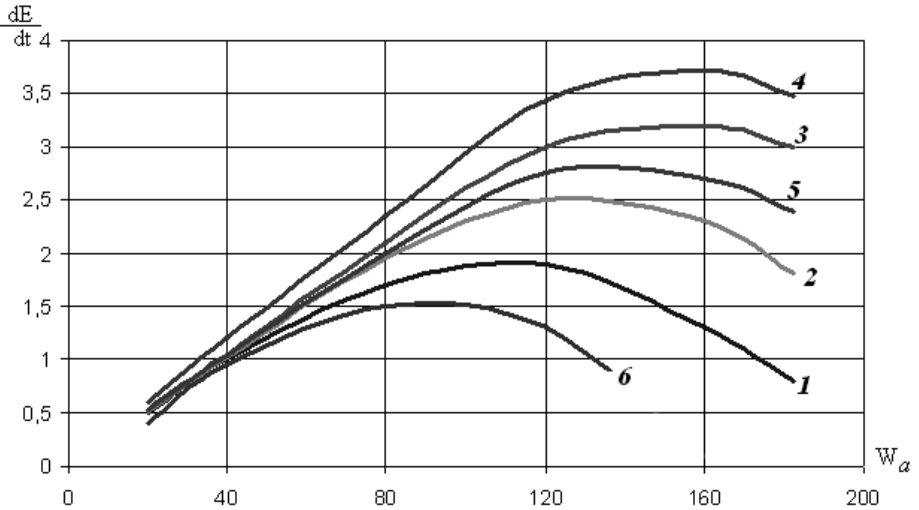
$l_{0,5}$  і  $l_{1,0}$  – абсолютна вологість повітря на висоті 0,5 і 2,0 м, мб.

Далі він показав, що інтенсивність випаровування можна визначати за вимірними на метеостанції температурою і абсолютною вологістю повітря з врахуванням швидкості вітру, розміру випарної поверхні, виду і стану рослин. Для застосування методу для масових розрахунків він склав таблиці і графіки.

Водоспоживання рослин, на думку О.Р. Костянтинова, визначаються зовнішніми та внутрішніми факторами. До зовнішніх факторів слід віднести, в першу чергу, погодні умови (випаровуваність  $E_0$ ) та запаси вологи в ґрунті  $W$ . Основними внутрішніми факторами є вид та сорт рослин  $B$  та фаза їх розвитку  $\Phi$ . Отже, зв'язок водоспоживання з величинами, що його визначають є багатофакторним і в символічному вигляді може записуватись як функція погодних умов, вологозапасів та біологічних властивостей  $E = f(E_0, W, B, \Phi)$ .

За випаровуваність  $E_0$  можна застосовувати інтенсивність випаровування з будь-якої сільськогосподарської культури в період активної вегетації при зімкненому травостої, якщо ґрунт при цьому оптимально зволожений. Це відповідає випадку, коли є необмежений підвід води до кореневмісного шару ґрунту, а аерація не порушена.

Для розрахунку  $E_0$  О.Р. Костянтинов розробив ряд номограм, в яких випаровуваність визначають за температурою  $t$  та абсолютною вологістю повітря  $e$ . При цьому до значень  $t$  та  $e$  вводять поправки на інерційність, які залежать від їх величини та дати розрахунку  $E_0$ . За даними  $E_0$  за кожен період вегетації (декаду, місяць і т. д.) знаходять її відношення до умовного сезонного ходу середньої випаровуваності, тобто  $E_0/\bar{E}_0$ . Для врахування біологічних властивостей рослин та вологості ґрунту О.Р. Костянтинов розробив ряд кривих водоспоживання (наприклад, для кукурудзи рис. 4.3).



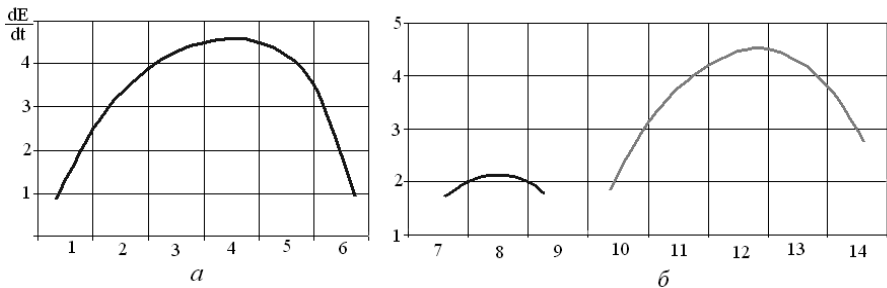
**Рисунок 4.3 – Залежність випаровування від вологості ґрунту під посівами кукурудзи: 1 – сходи; 2 – 7-й листок; 3 – викидання волоті; 4 – цвітіння волоті; 5 – молочна стиглість; 6 – повна стиглість.**

За цими кривими, знаючи запаси води можна зразу ж визначити інтенсивність випаровування при середніх погодних умовах. Потім знаходять дійсні значення водоспоживання

$$E = E_{\bar{E}_0} \cdot E / \bar{E}_0. \quad (4.34)$$

При побудові цих кривих О.Р. Костянтинов помітив, що максимальне водоспоживання для різних фаз окремих культур настає при запасах води, які змінюються в межах 70–90 % НВ. Такі запаси води підтримуються при зрошенні, тому ним були запропоновані біологічні криві водоспоживання при максимальному водоспоживанні (рис. 4.4). На думку О.Р. Костянтинова ці криві водоспоживання є стійкими зовнішніми характеристиками впливу біологічних властивостей рослин на процес їх водоспоживання при оптимальних запасах води в ґрунті.

Отже, за цими кривими можна визначити сумарне водоспоживання в будь-який час вегетаційного періоду, для оптимальних вологозапасів і стандартними погодними умовами, а потім за перехідним коефіцієнтом перейти до дійсного значення  $E$ .



**Рисунок 4.4 – Залежність випаровування від фенологічної фази розвитку рослин при оптимальному зволоженні:** а – кукурудза; б – пшениця озима; 1 - сходи; 2 – 7-й листок; 3 – викидання волоті; 4 - цвітіння волоті; 5 – молочна стиглість; 6 – повна стиглість; 7 – сходи; 8 – 3-й листок; 9 – кущіння; 10 – вихід в трубку; 11 – колосіння; 12 – цвітіння; 13 – молочна стиглість; 14 – воскова стиглість.

Простота у визначенні сумарного випаровування з використанням розрахункових графіків і таблиць за матеріалами стандартних спостережень гідрометеорологічної служби створює передумови для масового застосування методу О.Р. Костянтинова при вирішенні практичних завдань водогосподарського проектування. Однак неврахування в розглянутому методі вологоміну в кореневмісному шарі ґрунту, а також їх характеру і глибини залягання ґрунтових вод, може призвести до значних неточностей при розрахунку величин випаровування. Так, відхилення місячних величин випаровування, розрахованих за методом О.М. Костянтинова, від спостережених, за даними Р.Н. Смирнова, до 30 % забезпечуються тільки на 53 %.

#### 4.8. Термічні методи визначення сумарного водоспоживання

Так як основним фактором, який визначає розміри і витрату вологи полем, а також ріст і розвиток рослин, є термічний режим зрошуваного поля, то витрати води полем наближено можна розраховувати за методом І.А. Шарова

$$E = e_0 \sum (t + 2), \quad (4.35)$$

де  $t$  – середньодобова температура повітря,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\sum (t + 2)$  – сума температур за вегетаційний період;

$e_0$  – середньодобова витрата води полем на  $1^{\circ}\text{C}$  середньодобової температури, або модуль випаровування,  $\text{м}^3/\text{га}/\text{град}$ .

В розрахунку на більш короткі періоди формула І.А. Шарова набула вигляду

$$E = e \sum t + 4n, \quad (4.36)$$

де  $\sum t$  – сума середньодобових температур за розрахунковий період;  
 $e$  – коефіцієнт водоспоживання води полем, що припадає на  $1^\circ\text{C}$  (наближено величина  $e=2 \text{ м}^3$  на  $1^\circ\text{C}$ );  
 $n$  – кількість днів вегетаційного періоду.

**Приклад 4.7.** Розрахувати сумарне водоспоживання методом І.А. Шарова за декаду, якщо середня декадна температура повітря складає  $21,8^\circ\text{C}$ .

Розрахунок здійснюють за формулою (4.35)  $E = 2 \cdot 218 + 4 \cdot 10 = 476 \text{ м}^3/\text{га}$ .

При зволоженні ґрунту не менше  $65\text{--}70\%$  НВ Г.К. Льгов запропонував розраховувати сумарне випаровування (мм) за формулою

$$E = 1,88 \cdot \sum t. \quad (4.37)$$

Тут  $\sum t$  має те ж саме значення, що й у формулі І.А.Шарова.

**Приклад 4.8.** Розрахувати сумарне водоспоживання методом Г.К. Льгова за декаду, якщо середня декадна температура повітря складає  $21,8^\circ\text{C}$ .

Розрахунок здійснюють за формулою (4.37)  $E = 1,88 \cdot 218 = 410 \text{ м}^3/\text{га}$ .

Н.В. Данильченко для розрахунку випаровуваності використовує модифіковану формулу М.М. Іванова

$$E_0 = K_t \cdot d_\varphi \cdot f(v), \quad (4.38)$$

де  $E_0$  – випаровуваність (потенціальна евапотранспірація), мм;

$K_t$  – енергетичний фактор випаровування;

$d_\varphi$  – дефіцит вологості повітря, мб;

$f(v)$  – функція впливу швидкості вітру.

Енергетичний (температурний) фактор  $K_t$ , що враховує нелінійність зв'язку  $E_0$  і  $d_\varphi$  при зміні температури повітря, визначають за формулою

$$K_t = 0,00061(25 + t)^2 l_a, \quad (4.39)$$

де  $t$  – температура повітря,  $^\circ\text{C}$ ;

$l_a$  – пружність насиченого пару, що відповідає прийнятій до розрахунку температурі, мб.

Вітрову функцію розраховують таким чином:

$$f(v) = 0,64(1 + 0,19v_2), \quad (4.40)$$

де  $v_2$  – швидкість вітру на висоті 2 м від поверхні землі, м/с.



При визначенні сумарного водоспоживання (евапотранспірації) випаровуваність коригується з врахуванням особливостей рослин і клімату, а саме;

$$E = K_{\delta} \cdot K_0 \cdot E_0, \quad (4.41)$$

де  $K_{\delta}$  та  $K_0$  – біологічний та мікрокліматичний коефіцієнти.

**Приклад 4.9.** Розрахувати сумарне водоспоживання за формулою Н.В. Данильченка за декаду, якщо середня декадна температура повітря складає 21,8 °С, дефіцит вологості повітря – 11,4 мб, а швидкість вітру – 2 м/с.

Пружність насиченого пару, яка відповідає температурі повітря 21,8 °С складає 26,1 мб (див. додаток Е).

Енергетичний (температурний) фактор випаровування згідно формули (4.39) складе

$$K_t = 0,00061(25 + 21,8)^2 \cdot 26,1 = 34,9.$$

Вітрова функція за формулою (4.40) при швидкості вітру 2 м складе

$$f(v) = 0,64(1 + 0,19 \cdot 2) = 0,88 \text{ м}^3/\text{га}.$$

За формулою (4.38) випаровуваність за місяць складе

$$E_0 = 34,9 \cdot 11,4 \cdot 0,88 = 350 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Враховуючи біологічний і мікрокліматичний коефіцієнти згідно формули (4.41) сумарне випаровування складе  $E_0 = 350 \cdot 1,15 \cdot 0,85 = 342 \text{ м}^3/\text{га}$ .

## 4.9. Методи розрахунку сумарного водоспоживання, розроблені закордонними вченими

**Х.Ф. Блейні** (*Blaney H.F.*) та **В.Д. Крідл** (*Criddle W.D.*) вчені із США запропонували визначати сумарне водоспоживання за місяць (в дюймах) при необмежених вологозапасах визначати за формулою (Blaney H.F., Criddle W.D. 1950).

$$E = 25,4 \cdot k \cdot t \cdot p \cdot (114 - a), \quad (4.42)$$

де  $k$  – константа, що залежить від типу рослинного покриву (табл. 4.6);

$t$  – середня місячна температура повітря (по Фаренгейту);

$p$  – відношення світлого часу доби за місяць до світлого часу доби за рік, %;

$a$  – середня місячна відносна вологість повітря, %.

Випаровування за вегетаційний період розраховують за формулою, схожою з рівнянням О.М. Костякова

$$E = 25,4 \cdot K \cdot F, \quad (4.43)$$

де  $K$  – константа для вегетаційного або безморозного періоду;

$F$  – сума  $\sum t \cdot p$  за розглянуті місяці.

**Таблиця 4.6 – Коефіцієнт транспірації різних сільськогосподарських культур для формули (4.42)**

Культура	<i>k</i>	Культура	<i>k</i>	Культура	<i>k</i>
Пшениця	271–639	Люцерна	568–1068	Льон	400–932
Овес	423–876	Картопля	285–575	Картопля	435–767
Ячмінь	404–664	Сорго	239–303	Соняшник	490–577
Жито	431–634	Рис	395–811	Капуста	230–600
Кукурудза	239–495	Конюшина	330–737	Кавун	577–600
Просо	177–367	Буряк цукр.	304–377	Диня	597–621
Горох	563–747	Бавовник	368–650	Гарбуз	686–834

**Таблиця 4.7 – Коефіцієнти сумарного водоспоживання (*K*) для зрошуваних культур на заході США**

Культура	Тривалість вегетаційного періоду (місяць)	<i>K</i>	Культура	Тривалість вегетаційного періоду (місяць)	<i>K</i>
Люцерна	Весь безморозний період	0,80–0,85	Пасовища	Весь безморозний період	0,75
Боби	3	0,60–0,70	Цитрусові	7	0,50–0,65
Кукурудза	4	0,75–0,85	Картопля	3,5	0,65–0,75
Бавовник	7	0,60–0,65	Рис	3–5	1,00–1,20
Льон	7–8	0,80	Буряк цукр.	6	0,65–0,75
Зернові	3	0,75–0,85	Помідор	4	0,70
Сорго	4–5	0,70	Овочі (сер.)	3	0,60

**Тонтгейт Ц.В.** (США) запропонував визначати сумарне випаровування за допомогою температури з одночасним врахуванням впливу радіаційних потоків, вітру, вологості повітря та інших метеорологічних факторів. Тип рослинного покриву Тонтгейт не враховує

$$E_m = 1,6 \left( \frac{10 \cdot T}{I} \right)^a, \quad (4.44)$$

де  $E_m$  – потенційна транспірація за місяць;

$T$  – середня температура повітря, °С;

$I$  – теплобалансовий індекс, що розраховується як сума дванадцяти місячних показників  $i$ ,

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514}; \quad (4.45)$$

$a$  – кубічна функція  $I$ .

При використанні цього рівняння необхідно вносити кожен раз деяку поправку на кількість днів в даному місяці і тривалість дня. Таким чином, випаровування є складною функцією температури.

Після проведеної Тонтусейтом роботи з перевірки формули у нього немає достатнього переконання в можливості використання її для розрахунку потенційної транспірації в районах з кліматичними умовами відмінними від району, для якого була виведена ця формула.

Сума випаровування і транспірації рослинності, що росте на вологому ґрунті, лише в невеликій мірі залежить від типу рослинності.

**Х.Л. Пенман** (США) (*Penman H.L.*), запропонував метод, який знайшов достатньо широке застосування в ряді країн аридної зони (Пенман Х.Л., 1968)

$$E = k_e \cdot E_e, \quad (4.46)$$

де  $k_e$  – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює 0,8 – влітку, 0,6 – взимку, 0,7 – навесні та восени;

$E_e$  – випаровування з водної поверхні, що визначається за формулою

$$E_e = (a \cdot R + b \cdot E_u)(a + b)^{-1}, \quad (4.47)$$

$a$  – нахил кривої насичення водяного пару при заданій температурі повітря;

$R$  – радіаційний баланс;

$b$  – психометрична постійна;

$E_u$  – вітровий коефіцієнт, що дорівнює

$$E_u = 0,35(0,5 + 0,537 \cdot u)(e_{нас} - e), \quad (4.48)$$

$u$  – швидкість вітру на висоті 2 м;

$e_{нас}$  – пружність насиченості водяного пару;

$e$  – пружність водяного пару;

$e_{нас} - e$  – дефіцит вологості повітря.

Радіаційний баланс  $R$  розраховують за формулою

$$R = 0,95I_p \left( 0,18 + 0,55 \frac{\tau_{фак}}{\tau} \right) - \sigma T^4 \left( 0,56 - 0,09\sqrt{e} \left( 0,1 + 0,9 \frac{\tau_{фак}}{\tau} \right) \right), \quad (4.49)$$

де  $I_p$  – сонячна постійна;

$\frac{\tau_{фак}}{\tau}$  – відношення фактичної до можливої тривалості сонячного сьйва;

$\sigma T^4$  – довгохвильове випромінювання чорного тіла, що має температуру, рівну середньої температури повітря (величину можна знайти в тандартних таблицях);

$\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана.

Тут практично не враховується вплив біологічних особливостей культур на їх водоспоживання, особливо за фазами розвитку рослин.

За більш короткі періоди Пенман запропонував визначати сумарне випаровування за формулою

$$E = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} H + E_u}{\frac{\Delta}{\gamma} + x}, \quad (4.50)$$

де  $E_u$  – випаровуюча здатність атмосфери – величина розмірності енергії, яка враховує вплив швидкості вітру і дефіциту вологості повітря. Розраховується за формулою (4.48);

$\Delta$  – константа, яка залежить від температури і залежить тангенсу кута нахилу дотичної до кривої, що виражає залежність пружності насичення від температури повітря, в точці, відповідній середній температурі повітря;

$\gamma$  – психрометрична постійна відношення  $\frac{\Delta}{\gamma}$  – величина безрозмірна, від якої залежить співвідношення  $H$  і  $E_a$ ;

$H$  – радіаційний баланс;

$x$  – безрозмірний параметр.

При температурі повітря 10, 20 і 30 °C значення  $\frac{\Delta}{\gamma}$  відповідно дорівнює 1,3; 2,3 і 3,9, тобто вкладу енергії  $H$  у випаровування належить більша «вага» ніж вкладу енергії  $E_a$ .

Величини, що входять в рівнянні радіаційного балансу, розраховують за емпіричними формулами

$$H = R_j(1-r) - R_g, \quad (4.51)$$

$R_j$  – сумарна прихідна короткохвильова радіація;

$r$  – альbedo;

$R_g$  – ефективне довгохвильове випромінювання земної поверхні.

Залишок енергії, який дорівнює  $H$ , перерозподіляється таким чином. Основна його частина потрапляє знову в атмосферу разом з вод-

ним паром  $E$  і у вигляді висхідного турбулентного потоку тепла  $Q$ . Деяка кількість енергії  $S$  йде на зміну вмісту тепла в ґрунті. Величини  $E$  і  $Q$ , що ігнорують роль в забезпеченні життєдіяльності рослин, зазвичай достатньо великі. Величина  $S$  за періоди декількох тижнів практично на долю рослин не впливає, тому

$$H = E + Q. \quad (4.52)$$

Так як дія потоку  $Q$  полягає в підвищенні температури повітря, то саме за температурою і можна характеризувати потік  $Q$ . Автор спробував дати непряму оцінку складової  $Q$  рівняння теплового балансу з використанням широкого комплексу метеорологічних даних. За основу було прийняте припущення, що, подібно тому як потік водяного пару  $E$  через деякий шар в атмосфері визначається різницею тисків водяного пару на верхній і нижній границях цього шару, потік тепла  $Q$  визначається різницею температур на тих же рівнях. Шляхом нескладних алгебраїчних викладок із рівняння теплового балансу було отримане рівняння (4.50).

Радіаційний баланс  $H$  пов'язаний з метеорологічними факторами, але майже зовсім не залежить від сільськогосподарської культури, яка вирощується на розглянутій ділянці.

$$R_j = R_A \left( 0,18 + 0,55 \frac{\tau_{\text{фак}}}{\tau} \right), \quad (4.53)$$

де  $R_A$  – теоретичний максимум сонячної радіації – та її величина, яку отримала б дана точка земної поверхні при відсутності атмосфери (значення  $R_A$  можна знайти в таблицях);

$$R_g = \sigma T^4 \left( 0,56 - 0,09 \sqrt{e} \right) \left( 0,1 + 0,9 \frac{\tau_{\text{фак}}}{\tau} \right), \quad (4.54)$$

Безрозмірний параметр  $x$  Пенман запропонував розраховувати за формулою

$$x = \frac{1}{SD}, \quad (4.55)$$

де  $S < 1$  – множник, що залежить від геометрії прорихів;

$D < 1$  – множник, величина, якого визначається тривалістю дня.

Однак кількісна оцінка параметрів  $S$  і  $D$  ускладнена, і Бізінгер запропонував за аналогією з випадком відкритої водної поверхні вважати  $x$  рівним 1.

Розрахунок  $E$  здійснювався в два етапи. Спочатку для деякої гіпотетичної водної поверхні з врахуванням змін в даний момент значень

температури, вологості повітря та інших метеорологічних величин розраховується  $E_0$ .

Потім за допомогою коефіцієнта  $f = E_m / E_0$ , значення якого для різних кліматичних зон і різних пір року різні. При розрахунку значень  $f$  за основний діючий фактор приймається тривалість дня, так що, наприклад, в екваторіальній зоні протягом всього року  $f=0,7$ , а в Західній Європі влітку  $f=0,8$ , взимку  $f=0,6$ , восени і навесні  $f=0,7$ .

Як показує досвід застосування формули, вона дає задовільні результати в досить різних кліматичних умовах.

Подальший досвід розрахунків показав, що обчислення не обов'язково здійснювати в два етапи. Враховується альbedo зеленої маси  $r=25\%$  і використовується запропонований Пенманом спосіб врахування шорсткості рослинного покриву, маємо

$$E_m = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} H_m + E_u}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}, \quad (4.56)$$

$$H_m = 0,75R_j - R_g. \quad (4.57)$$

В подальшому розробки Пенмана використані при обґрунтуванні найбільш розповсюдженого в світі методу розрахунку режимів зрошення – методу ФАО, де за основу еталонного випаровування прийнята модифікована формула Пенмана-Монтейна (див. п. 4.10) (Romashchenko M., Shatkowski A., Zhuravlev O., 2016).

Крім цього, в США був розроблений **радіаційний метод** в основі якого лежить формула

$$E = 0,0075 \cdot \frac{S \cdot T}{L}, \quad (4.58)$$

де  $S$  – сумарна радіація;

$T$  – середня температура за розрахунковий період;

$L$  – скрита теплота випаровування.

При відсутності даних про сумарну радіацію її величину можна розрахувати за формулою

$$S = 0,0075 \cdot S_{роз} \cdot k_S \cdot (100 - a)^{1/2}, \quad (4.59)$$

де  $S_{роз}$  – сумарна радіація, що розрахована для даної широти та довготи з урахуванням висоти над рівнем моря;

$k_S$  – емпіричний коефіцієнт (як правило, його приймають 0,5);  
 $a$  – відносна вологість повітря.

Французький вчений **Л.Тюрк** (Тюрк Л., 1958) запропонував визначати сумарне випаровування за формулою

$$E = (P + \Delta W + V) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{P + \Delta W}{E_0} + \frac{V}{2 \cdot E_0} \right)^n \right]^{-1/n}, \quad (4.60)$$

де  $P$  – атмосферні опади;

$\Delta W$  – зміна запасів продуктивної вологи за розрахунковий період;

$V$  – додаткове водоспоживання, що обумовлене рослинністю;

$E_0$  – випаровуваність;

$n$  – емпіричний параметр, що пов'язаний з рельєфом місцевості (для рівнинної території  $n=3$ , для розчленованого рельєфу  $n=2$ ).

Величину випаровуваності за рік визначають за формулою

$$E_0 = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3, \quad (4.61)$$

а за більш короткі періоди за формулою

$$E_0 = \frac{T + c}{16} \sqrt{S_p}, \quad (4.62)$$

де  $T$  – середня температура за вказаний період;

$S_p$  – сумарна радіація;

$c$  – кількість декад від двадцятого дня після сівби.

Додаткове водоспоживання

$$V = 25 \sqrt{\frac{k_\delta \cdot B}{m}}, \quad (4.63)$$

де  $B$  – кінцева маса сухої речовини;

$k_\delta$  – емпіричний коефіцієнт транспірації даної сільськогосподарської культури;

$m$  – поливна норма.

В пізніших розробках запропоновані простіші формули для розрахунку водоспоживання сільськогосподарських культур

$$E = 0,13 \frac{T}{T + 15} (S_p + 50), \quad (4.64)$$

$$E = 0,13 \frac{T}{T + 15} \left[ L_0 \left( 0,18 + 0,62 \frac{\tau_{\text{фак}}}{\tau} \right) + 50 \right], \quad (4.65)$$

де  $L_0$  – сонячна постійна;

$\tau_{\text{фак}}$  та  $\tau$  – фактична добова та астрономічна тривалість сонячного сьайва.

Розрахунки за цими формулами знайшли досить широке застосування в ряді країн Західної Європи та деяких країн аридних регіонів світу. Обмежує застосування цієї методики локальний характер формул для розрахунку випаровування та випаровуваності, а також ненадійність врахування з допомогою  $k_b$  біологічних особливостей водоспоживання рослин в різні фази їх розвитку.

#### 4.10. Розрахунок сумарного водоспоживання методом ФАО

Значний інтерес представляють рекомендації розроблені групою експертів ФАО (англ. Food and Agriculture Organization, FAO) – продовольча та сільськогосподарська організація ООН. Цей метод на сьогодні має найкраще теоретичне обґрунтування і найчастіше застосовується в більшості країн світу. Розрахунок водоспоживання вони пропонують проводити в два етапи.

На першому визначають потенційну евапотранспірацію еталонної культури  $E_{OE}$ . За еталонну поверхню приймається гіпотетична трав'яниста поверхня з висотою трави 0,12 м, опором поверхні 70 с/м і альбедо 0,23. Еталонна поверхня близька до поверхні, покрита зеленою, добре зволоженою травою однакової висоти, що активно росте і повністю затіняє землю. Фіксований опір поверхні 70 с/м передбачає помірно суху поверхню ґрунту внаслідок рідких поливів (Allen R.G. 1992).

В результаті експертної консультації ФАО в 1990 р. метод *Пенмана-Монтейта* (Penman – Monteith) був рекомендований як єдиний для визначання і розрахунку  $E_{OE}$ . Цей метод потребує наявності даних сонячної радіації, температури і вологості повітря та швидкості вітру (Allen R.G. 2010).

Комбіноване рівняння Пенмана-Монтейта має такий вигляд (Allen R.G. 1992).

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G)_n + \rho_a \cdot c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}, \quad (4.66)$$

де  $R_n$  – чиста радіація (освітленість), Вт/м<sup>2</sup>;



$G$  – тепловий потік ґрунту, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\rho_a$  – середня щільність повітря при постійному тиску, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_p$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);  
 $\Delta$  – залежність тиску насиченої пари від температури, Па/К;  
 $e_s - e_a$  – дефіцит тиску парів у повітрі, Па;  
 $\lambda$  – скрита теплота пароутворення, Дж/кг;  
 $\gamma$  – психрометрична стала, Па/К;  
 $r_s$  і  $r_a$  – сукупний поверхневий і аеродинамічний опір, с/м.

Перенесення тепла і водяної пари з випарної поверхні в повітря над рослинами визначається *аеродинамічним опором*:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 u_z}, \quad (4.67)$$

де  $r_a$  – аеродинамічний опір, с/м;

$z_m$  – висота вимірювання швидкості вітру, м;

$z_h$  – висота вимірювання вологості повітря, м;

$d$  – висота вимірювань над поверхнею землі, м;

$z_{om}$  – довжина шорсткості, що визначає передачу моменту, м;

$z_{oh}$  – довжина шорсткості, що регулює перенос тепла і пари, м;

$k$  – постійна Кармана,  $k = 0,41$ ;

$u_z$  – швидкість вітру на висоті  $Z$ , м/с.

Рівняння обмежене для нейтральних умов стійкості, тобто таких, де температура, атмосферний тиск, швидкість вітру розподілені майже за адіабатичних умов (без теплообміну). Застосування рівняння на короткі періоди часу (годину або менше), може вимагати включення виправлення для стабільності. Однак, при прогнозуванні  $E_0$  для добре зволоженої еталонної поверхні, при невеликому теплообміні, корегування може не знадобитись.

Багато досліджень було присвячено вивченню вітрового режиму в кронах рослин (травостої). Нульове зміщення висоти і довжини шорсткості повинне прийматись до уваги, якщо поверхня покрита рослинністю. Фактори залежать від висоти і конфігурації рослинності. Для визначення  $d$ ,  $z_{om}$  і  $z_{oh}$  виведено декілька емпіричних рівнянь. Розрахунок аеродинамічного рівняння для еталонної трав'янистої поверхні наведений у прикладі 4.7.

**Приклад 4.7. Визначення аеродинамічного опору еталонної трав'янистої поверхні**

Для широкого спектра культур висота зміщення нульової площини ( $d$ , м) і довжини шорсткості, що керує передачею імпульсу  $z_{om}$ , м, можуть бути визначені через висоту рослин  $h$ , м за допомогою рівняння:

$$d = \frac{2}{3}h,$$
$$z_{om} = 0,123h.$$

Довжина шорсткості, що керує передачею тепла і пари  $z_{oh}$ , м, може бути апроксимована:

$$z_{oh} = 0,1 \cdot z_{om}.$$

Приймаючи висоту рослин постійною, рівною 0,12 м і стандартну висоту вимірювання швидкості вітру, температури і вологості повітря 2 м ( $z_m = z_h = 2$  м), аеродинамічний опір  $r_a$  с/м для еталонної трав'яної поверхні складе

$$r_a = \frac{\ln \left[ \frac{2 - \frac{2}{3} \cdot 0,12}{0,123 \cdot 0,12} \right] \cdot \ln \left[ \frac{2 - \frac{2}{3} \cdot 0,12}{0,1 \cdot 0,123 \cdot 0,12} \right]}{0,41^2 \cdot u_2} = \frac{208}{u_2},$$

де  $u_2$  – швидкість вітру на висоті 2 м, м/с.

«Сукупний» опір поверхні описує опір потоку пари через транспірацію рослини і випарну поверхню ґрунту. Там, де рослинність не покриває ґрунт повністю, фактор опору повинен включати ефекти випаровування з поверхні ґрунту. Якщо рослина не транспірує з потенційною швидкістю, опір залежить також від водного стану рослинності. Прийнятне наближення до більш складного відношення між опором поверхні і щільним рослинним покривом може бути виражене таким чином:

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{active}}, \quad (4.68)$$

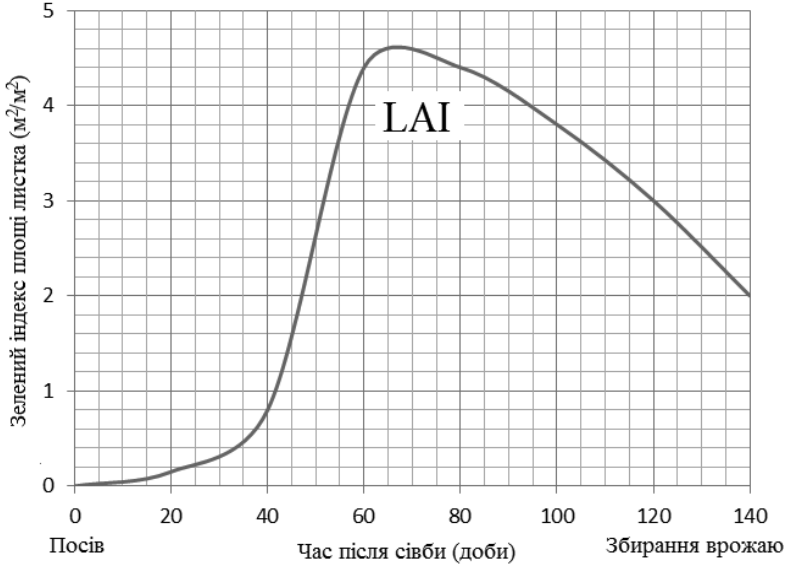
де  $r_s$  – «сукупний» опір поверхні, с/м;

$r_1$  – загальний опір добре освітленого листка, с/м;

$LAI_{active}$  – індекс активної освітленості частини листка,  $m^2/m^2$  (поверхні листка до поверхні ґрунту).

Індекс площі листка ( $LAI$ ) (безрозмірна величина) – це площа листка (тільки верхнього боку), віднесеного до одиниці площі під ним. Він виражається в  $m^2$  листового покриву на  $m^2$  поверхні ґрунту. Активний  $LAI$  – це індекс листової поверхні, яка активно бере участь в перенесенні тепла і пари. Це зазвичай верхня, освітлена частина густої крони.  $LAI$  варіює для різних культур, але 3–5 – найбільш розповсю-

джене значення для багатьох дорослих рослин. Зелений LAI для даної культури змінюється протягом сезону і досягає максимуму перед квітуванням (рис. 4.5). LAI також залежить від густоти рослин і різновиду культур.



**Рисунок 4.5 – Типове представлення зміни індексу площі листя протягом вегетаційного періоду для кукурудзи**

Сумарний опір листка  $r_1$  – є середній опір окремого листка. Цей опір є специфічним для культури і змінюється залежно від типу культури і управління ними. З ростом і дозріванням рослини він збільшується, однак, по відношенню до змін  $r_1$  з часом і для різних культур є недостатність консолідованої інформації. Інформація стосовно провідності і опору листка, що є в літературних джерелах, частіше орієнтована на фізіологічні і екофізіологічні дослідження.

Опір  $r_1$  піддається впливу клімату і водності. Однак, цей вплив відрізняється для різних культур і може проявлятися по-різному. Він збільшується при водному стресі культури і при обмеженні евапотранспірації наявністю вологи. Деякі дослідження показують, що на опір впливають інтенсивність радіації, температура і дефіцит тиску пари. Вивід опору для еталонної трав'яної поверхні представлений у прикладі 4.8.

**Приклад 4.8. Визначення сумарного опіру еталонної трав'яної поверхні**

Загальне рівняння для  $LAI_{active}$  має вигляд:

$$LAI_{active} = 0,5LAI,$$

і приймає до уваги факт, що тільки верхня половина густої підстриженої трави приймає активну участь в передачі поверхнею тепла і пари. Для підстриженої трави загальне рівняння  $LAI$  має

$$LAI = 24 \cdot h,$$

де  $h$  – висота трави [м].

Опір одного листка  $r_1$  має значення біля 100 с/м в умовах доброї зволоженості. Приймаючи висоту культури 0,12 м, опір поверхні для еталонної трав'яної поверхні стає рівним (рівняння 4.64):

$$r_1 = \frac{100}{0,5 \cdot 24 \cdot 0,12} \approx 70 \text{ с/м.}$$

Продовольча і сільськогосподарська організація ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) рекомендувала модель *Penman-Monteith* (скорочено РМ) прийняти як стандартний метод для оцінки потенційної евапотранспірації еталонної поверхні (наприклад, трави). Ця модель відома як FAO-56 (Allen, R.G. 1992, 2010).

До переваг моделі РМ необхідно віднести використання в розрахунках випаровуваності багатьох перемінних метеорологічних даних, в том числі загальної сонячної радіації, альbedo, фактичної і можливої тривалості сонячного сйва. Однак необхідність використовувати велику кількість метеорологічних даних для розрахунків  $E_0$  обмежує застосування цього методу, так як далеко не на всіх метеорологічних станціях проводяться всі необхідні для розрахунку спостереження.

Метод Пенмана-Монтейта, сформульований вище, включає в себе всі параметри, які регулюють обмін енергії і відповідний прихований тепловий потік (сумарне випаровування) з однорідних просторів рослинності. Більшість параметрів вимірюються та можуть бути легко розраховані за даними про погоду. Рівняння можуть бути використані для прямого розрахунку будь-якої евапотранспірації посівів на поверхні і аеродинамічного опору конкретної культури.

Рівняння Пенмана-Монтейта (FAO) може бути виведене із початкового рівняння (4.62) і рівнянь аеродинамічного (4.63) і поверхневого (4.64) опорів (Allen, R.G. 1992).

$$E_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (4.65)$$

де  $E_0$  – еталонна евапотранспірація, мм/добу;

$R_n$  – чиста радіація на поверхні рослин, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);  
 $G$  – щільність теплового потоку ґрунту, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);  
 $T$  – середньодобова температура повітря на висоті 2 м, °С;  
 $u_2$  – швидкість вітру на висоті 2 м, м/с;  
 $e_s$  – тиск пари насичення в повітрі, кПа;  
 $e_a$  – фактичний тиск пари в повітрі, кПа;  
 $(e_s - e_a)$  – дефіцит тиску пари насичення повітря, кПа;  
 $\Delta$  – похил кривої тиску пари, кПа/°С;  
 $\gamma$  – психрометрична постійна, кПа/°С.

Еталонна евапотранспірація  $E_0$  забезпечує стандарт, з яких:

- можна порівнювати евапотранспірацію в різні періоди року;
- можна співставити евапотранспірацію для інших культур.

Рівняння використовує стандартні кліматичні величини сонячної радіації, температури та вологості повітря і швидкості вітру. Для підвищення сумісності даних, вимірювання величин повинні здійснюватись на висоті 2 м (або перераховані для цієї висоти) над поверхнею зеленої трави, яка затіняє поверхню і добре зволожена.

Рівняння евапотранспірації на базі кліматичних даних не може бути використаним для точного розрахунку евапотранспірації в різних кліматичних умовах через спрощення в формулюванні і похибок вимірювань. Можливо, точні вимірювання в ідеальних екологічних умовах можуть показати значення, відмінні від отриманих за допомогою формули Пенмана-Монтейта. Однак, нарада експертів погоди-лась використовувати гіпотетичне еталонне визначення рівняння Пенмана-Монтейта для  $E_0$  трави при виведенні коефіцієнтів культури.

**Приклад 4.9. Застосування рівняння Пенмана-Монтейта для гіпотетичної еталонної трав'яної культури**

При стандартній висоті вимірювання швидкості вітру, температури і вологості 2 м ( $z_m = z_h = 2$  м) і висоті рослин 0,12 м аеродинамічний і поверхневий опір дорівнюють (приклад 4.7 і 4.8):

$$r_a = \frac{208}{u_2} \text{ с/м (при швидкості вітру } u_2 \text{ на висоті 2 м),}$$

$$r_s = 70 \text{ с/м,}$$

$$\left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right) = (1 + 0,34).$$

$R_n$  і  $G$  зазвичай приводяться до одиниці площі і виражаються в МДж/(м<sup>2</sup>·добу). Для перетворення одиниць енергії радіації в еквівалентний шар

води (мм) зі скритим теплом пароутворення, використовується коефіцієнт  $\lambda$ . Перетворення енергії у відповідний шар води або навпаки представлено рівнянням:

$$\text{Радіація}[\text{мм/добу}] \approx \frac{\text{Радіація}[\text{МДж}/(\text{м}^2 \text{добу})]}{2,45} = 0,408 \text{Радіація}[\text{МДж}/\text{м}^2 \text{добу}]$$

Підставляючи  $c_p$  з перетворенням рівняння психрометричної постійної (5.34) маємо:

$$c_p = \frac{\gamma \cdot \varepsilon \cdot \lambda}{P},$$

і розглядаючи закон ідеального газу для  $p_a$ :

де  $T_{Kv}$  – віртуальна температура, може бути замінена на

$$T_{Kv} = 1,01(T + 273)$$

з отриманням

$$\frac{c_p \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \cdot \varepsilon \cdot \lambda}{1,01(T + 273)R \cdot 208} u_2, \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{с}),$$

де  $c_p$  – питома тепло при постійному тиску, МДж/(кг·°C);

$\rho_a$  – середня щільність повітря при постійному тиску, кг/м<sup>3</sup>;

$r_a$  – аеродинамічний опір, с/м;

$\gamma$  – психрометрична постійна, кПа/°C;

$\varepsilon$  – відношення молекулярної ваги водяного пару і сухого повітря = 0,622;

$\lambda$  – скрите тепло пароутворення, МДж/кг;

$u_2$  – швидкість вітру на висоті 2 м, м/с;

$R$  – питома газова постійна, складає 0,287 кДж/(кг·K);

$T$  – температура повітря, °C;

$P$  – атмосферний тиск, кПа.

$$\frac{c_p \rho_a}{r_a} = \frac{0,622 \cdot \gamma \cdot \lambda}{1,01(T + 273) \cdot 0,287 \cdot 208} u_2, \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{добу}),$$

або віднесене до  $\lambda$  ( $\lambda = 2,45$ ):

$$\approx \gamma \frac{900}{T + 273} u_2, \text{ мм}/(\text{°C} \cdot \text{добу}).$$

На **другому етапі** розрахунку сумарного водоспоживання визначають коефіцієнт водоспоживання конкретних культур  $K_c$ , виходячи

із залежності  $K_c = \frac{E_c}{E_0}$ , де  $E_c$  – сумарне випаровування (евапотранспірація) культури, яка визначається експериментально.

Евапотранспірація рослин суттєво відрізняється від еталонної евапотранспірації ( $E_0$ ), оскільки культурні рослини відрізняються від трави ступенем покриття поверхні, кронами рослин і аеродинамічним

опором. Вплив характеристик, що відрізняють сільськогосподарські культури від трави, об'єднані в коефіцієнті культури ( $K_c$ ).

Коефіцієнт культури  $K_c$  представляє собою об'єднаний вплив чотирьох різних характеристик, які відрізняють культури від еталонної трави. Це такі характеристики:

- *Висота рослин*, яка впливає на аеродинамічний опір  $r_a$  рівняння Пенмана-Монтейта і турбулентний перенос пари від рослин в атмосферу. Величина  $r_a$  в повній формі рівняння Пенмана-Монтейта присутня двічі.

- *Альbedo* (відбиваюча здатність) *поверхні* «рослина-грунт». На альbedo впливають частина поверхні, покрита рослинністю і вологість ґрунту. Альbedo поверхні, в свою чергу, впливає на чисту радіацію поверхні  $R_n$ , яка є головним джерелом обміну енергією для процесу випаровування.

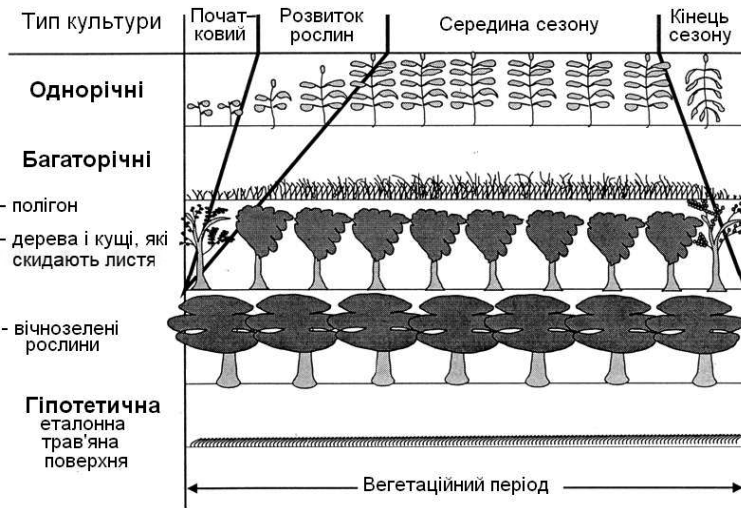
- *Опір крони* видалення пари залежить від площі листового покриття (кількості *продихів та кутикул*), віку листя і їх умов росту, і ступеня контролю продихів і кутикул. Опір крони впливає на опір поверхні  $r_s$ .

- *Випаровування з ґрунту*, особливо оголеної.

Вологість поверхні ґрунту і частини поверхні, покрита рослинністю, впливають на опір поверхні  $r_s$ . Після зволоження ґрунту швидкість відводу від неї пари висока, особливо для рослин, які не повністю покривають ґрунт. Сумарний опір ґрунту і крони рослин визначає (сумарний) опір поверхні  $r_s$ . Опір поверхні в рівнянні Пенмана-Монтейта представляє опір відводу пари з листя рослин і з ґрунту.

В процесі розвитку рослини змінюються: покриття поверхні, висота рослин і площа листя. Через різницю в евапотранспірації протягом різних стадій росту  $K_c$  для даної культури буде змінюватись протягом вегетаційного періоду. Вегетаційний період може бути поділений на чотири стадії росту: початкову, розвиток рослини, середину сезону і кінець сезону. Рис. 4.6 ілюструє загальну послідовність і пропорції цих стадій для різних видів культур.

*Початкова стадія* триває з дати висаджування до 10 % покриття поверхні ґрунту рослинністю. Тривалість початкового періоду залежить від культури, її різновиду, дати висаджування і клімату. Закінчення початкового періоду визначається часом 10 % покриття земної поверхні рослинністю. Для багаторічних культур дата висаджування вимірюється датою «озеленення», тобто часом появи нового листя.



**Рисунок 4.6 – Стадії росту рослин для різних типових культур**

За час початкового періоду площа листя незначна і евапотранспірація відбувається, в основному, у вигляді випаровування з поверхні ґрунту. Отже,  $K_c$  протягом початкового періоду ( $K_{c,ini}$ ) значний, коли ґрунт вологий після зрошення або дощу, і менший, коли поверхня суха. Час висихання ґрунту визначається інтервалом між зволоженнями, випарною силою атмосфери ( $E_0$ ) і ступенем зволоження.

*Стадія розвитку рослин* триває, починаючи з 10 % до повного покриття рослинами поверхні. Ефективне повне покриття для багатьох культур співпадає з початком квітування. Для культур, що ростуть рядами, таких, як боби, цукрові буряки, картопля і кукурудза, ефективне покриття може визначатись як час, коли листя із сусідніх рядів розпочинають перекривати один одного так, що поверхня залишається майже повністю затіненою, або коли рослини досягають майже повного розміру, якщо перекриття листя не відбувається. Для деяких культур, особливо висотою рослин вище 0,5 м, середня частка поверхні, покритої рослинністю ( $f_c$ ) до початку ефективного повного покриття рівна 0,7–0,8. Частка освітленого і затіненого ґрунту і листя істотно не змінюються з ростом рослини ( $f_c \approx 0,7–0,8$ ). Звісно, що культура або рослина може продовжувати рости як у висоту, так і за площею листя після часу повного покриття. Оскільки важко визначити візуально, коли густо засіяна рослинність, така, як озимі і ярі зер-



нові і деякі трави, сягає повного ефективного покриття, для цих типів культур зазвичай використовується початок квітування.

Для густої трави ефективне повне покриття може наступити при висоті 0,10–0,15 м. Для невеликих полігонів висота трави може досягти 0,3–0,5 м до настання повного покриття. Густо висаджені кормові, такі, як люцерна і конюшина, сягають повного покриття при висоті 0,3–0,4 м.

Ще один спосіб визначення повного ефективного покриття – за досягненням індексу площі листя (LAI) значення 3. LAI визначається як відношення середньої загальної площі листя (один бік) до одиниці площі поверхні ґрунту.

З розвитком рослини, розвивається і все більше затіняється ґрунт, випаровування все більше обмежується і транспірація стає основним процесом. В стадії розвитку рослини значення  $K_c$  відповідає покриттю поверхні і розвитку рослини. Зазвичай, якщо поверхня ґрунту суха,  $K_c = 0,5$  відповідає 25–40 % покриттю поверхні рослинністю дякуючи ефекту затінення і мікропереносу фізичного тепла із ґрунту в рослинність.  $K_c = 0,7$  часто відповідає 40–60 % покриттю. Ці значення варіюють залежно від культури, частоти зволоження і від того, чи споживає рослина більше води, ніж еталонна культура при повному покритті (тобто залежно від архітектури крони і висоти рослин по відношенню до підстриженої трави).

*Стадія середини сезону* розпочинається з моменту повного ефективного покриття до моменту початку досягання. Початок досягання зазвичай, характеризується початком старіння, жовтіння і опадання листя або пожовтіння фруктів до ступеня, коли евапотранспірація знижується відносно  $E_0$ . Стадія середини сезону є найбільш тривалою для багаторічних культур і багатьох однорічних, або може бути відносно короткою для овочів, які збираються свіжими.

У стадії середини сезону  $K_c$  сягає максимальної величини. Значення  $K_c$  ( $K_{c,mid}$ ) є відносно постійним для більшості умов росту культур. Відхилення  $K_{c,mid}$  від еталонної величини «1», в першу чергу, завдячуючи різниці у висоті рослин і опорі між еталонним трав'яним покривом і сільськогосподарською культурою та погодними умовами.

*Стадія завершення сезону* триває з початку досягання до збирання врожаю або повного опадання листя. Розрахунок  $K_c$  і  $E_c$  приурочений до збирання врожаю, природному висиханню або опаданню листя.

Для деяких багаторічних рослин в регіонах з безморозним кліматом культури можуть зростати цілий рік так, що дата закінчення сезону може бути суміщена з датою висаджування рослин.

$K_c$  до кінця сезону ( $K_{c,end}$ ) відображає практику управління культурами і водою.  $K_{c,end}$  має вагому величину, якщо культура часто зволожується до збирання в свіжому вигляді. Якщо культурі дозволяють висохнути в полі до збирання, то  $K_{c,end}$  буде незначним.

Для визначення  $K_c$  застосовують два методи: метод єдиного і подвійного коефіцієнта культури.

**Метод єдиного коефіцієнта культури ( $K_c$ )** поєднує в собі різницю між випаровуванням з ґрунту і транспірацією рослинами для культури і еталонного трав'яного покриву. Оскільки випарування з ґрунту може коливатися щоденно в результаті випадіння дощу або зрошення, єдиний коефіцієнт виражає лише осереднений в часі (багатоденний) вплив евапотранспірації.

Оскільки єдиний коефіцієнт осереднює випаровування з ґрунту і транспірацію, метод використовується для розрахунку  $E_c$  щотижнево або для більш тривалих періодів, хоча розрахунки можуть бути продовжені і на щоденній основі. Єдиний коефіцієнт  $K_c$ , осереднений в часі, використовується для досліджень по плануванню зрошення і проектуванню іригаційних систем, де осереднені ефекти зволоження ґрунту прийнятні і відповідають вимогам. Це характерно для поверхневого зрошення і дощування, де інтервал між поливами відповідає декільком дням або більше. Для управління типовим зрошенням достатній єдиний осереднений в часі  $K_c$ .

Узагальнена крива коефіцієнта культури показана на рис. 4.7. Одразу після висаджування однорічних або появи листя багаторічних рослин  $K_c$  має мінімальні значення, часто менше 0,4.  $K_c$  розпочинає збільшуватись від початкового значення  $K_{c,ini}$  з моменту початку швидкого розвитку рослини і сягає максимальної величини  $K_{c,mid}$  в момент максимального або близького до максимального розвитку рослини. Протягом сезону, з зміною в часі, як листя розпочинає старіти через природні причини або причини, викликані сільськогосподарською практикою,  $K_c$  розпочинає знижуватись, доки не досягне більш низької величини до кінця вегетаційного періоду, рівним  $K_{c,end}$ .

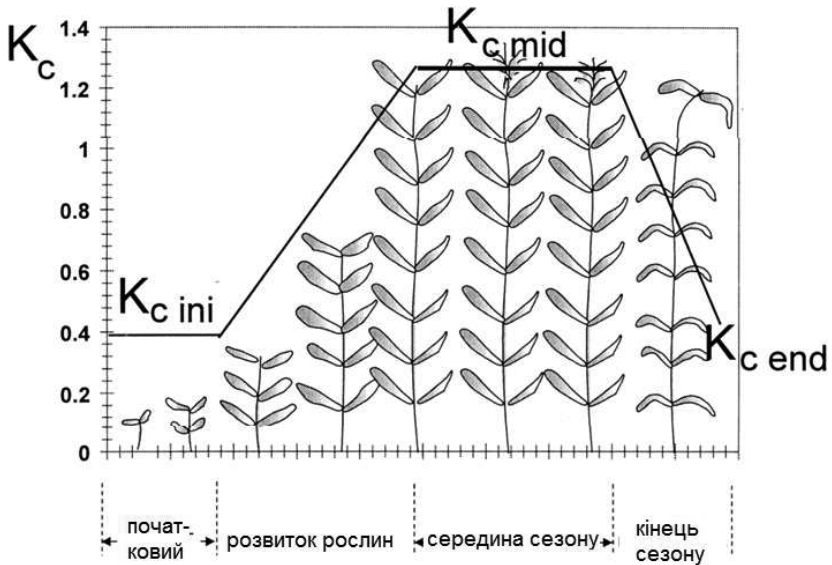


Рисунок 4.7 – Узагальнена крива коефіцієнту культури для методу коефіцієнта єдиної культури

**Метод подвійного коефіцієнту культури** використовує два коефіцієнти: базовий коефіцієнт культури ( $K_{cb}$ ) для опису транспірації рослинами і коефіцієнт випаровування з ґрунту ( $K_e$ ) для опису випаровування з ґрунту. Єдиний коефіцієнт  $K_c$  замінюються на (Allen, R.G. 1992):

$$K_c = K_{cb} + K_e, \quad (4.69)$$

де  $K_{cb}$  – базовий коефіцієнт культури;

$K_e$  – коефіцієнт випаровування з ґрунту.

Базовий коефіцієнт культури  $K_{cb}$  визначається як відношення  $E_c$  до  $E_0$ , коли поверхневий шар ґрунту сухий, але середня вологість ґрунту в кореневій зоні відповідає потребі повної транспірації рослин.  $K_{cb}$  представляє базовий потенціальний  $K_c$  при відсутності додаткових ефектів зволоження ґрунту поливами або опадами. Коефіцієнт випаровування з ґрунту  $K_e$ , описує компонент випаровування з поверхні ґрунту. Якщо ґрунт вологий після зрошення або опадів,  $K_e$  може бути більшим. Однак, сума  $K_{cb}$  і  $K_e$  ніколи не може перевищити величину  $K_{c,max}$ , визначену за наявності енергії для евапотранспірації з поверхні ґрунту. За результатом висихання поверхні ґрунту,  $K_e$  зменшується і знижується до нуля, коли для випаровування не залишається вологи. Визначення  $K_e$

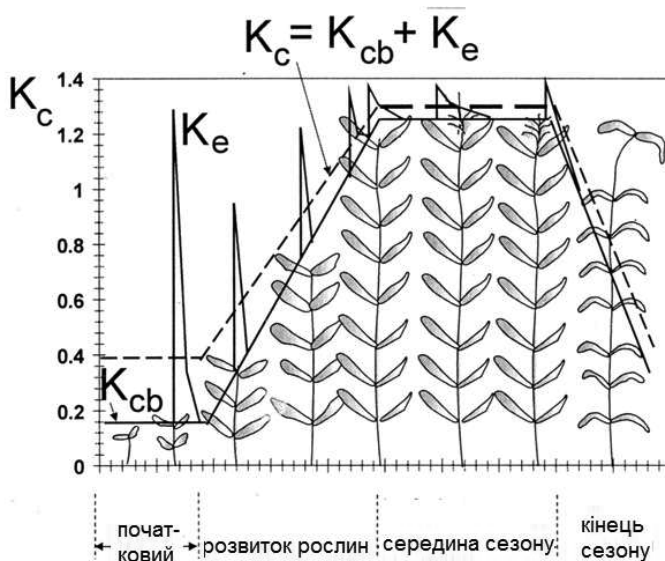
потребує розрахунку щоденного водного балансу для визначення ґрунтової вологи, яка залишилась у верхньому шарі ґрунту.

Метод подвійного коефіцієнта культури потребує більшого об'єму розрахунків, ніж метод єдиного осередненого в часі коефіцієнту  $K_c$ . Метод подвійного коефіцієнту є найкращим при плануванні зрошення в реальному часі, розрахунку водного балансу ґрунту в дослідженнях, коли важливими є вплив щоденних змін вологості поверхні ґрунту і результируючий вплив на щоденне  $E_0$  водного профіля ґрунту, а також глибинна фільтрація. Це випадок високочастотного зрошення в системах мікрозрошення або системах горизонтального руху, таких, як дощувачі центрального або лінійного типу.

Крива єдиного осередненого в часі коефіцієнту  $K_c$  на рис. 4.7 з'єднує осереднений ефект зволоження в рамках фактору  $K_c$ . Значення  $K_{c,mid}$  є відносно постійним для більшості умов рослинництва. Однак, значення  $K_{c,ini}$  і  $K_{c,end}$  можуть значно коливатись протягом доби, залежно від частоти зволоження зрошенням або опадами. За методом подвійного коефіцієнту  $K_c$  розраховують фактичне збільшення  $K_c$  для кожного дня, як функцію розвитку рослин і вологості поверхні ґрунту.

Оскільки єдиний  $K_c$  включає осереднений вплив випаровування з ґрунту, базовий коефіцієнт культури  $K_{cb}$ , що описує тільки транспірацію рослин, має значення нижче  $K_c$  (рис. 4.8). Найбільша різниця між  $K_c$  і  $K_{cb}$  спостерігається в початковій фазі росту рослин, коли евапотранспірація в формі випаровування з ґрунту і транспірації рослинами ще мала. Оскільки в середині сезону крони рослин повністю або майже повністю покривають поверхню ґрунту, випаровування з ґрунту в таких умовах стає менше впливу на евапотранспірацію рослин і величина  $K_{cb}$  в середині сезону буде близька до значення  $K_c$ . Залежно від покриву базовий коефіцієнт культури в середині сезону може бути лише на 0,05–0,1 менше  $K_c$ . Залежно від частоти зрошення протягом кінцевого періоду вегетаційного сезону  $K_{cb}$  буде дорівнювати (при частому зрошенні) або менше  $K_c$ .

На рис. 4.8 наведені типові криві  $K_{cb}$ ,  $K_e$  і єдиний  $K_c$ . Крива  $K_{cb}$  представлена мінімальним  $K_c$  для умов відповідно вологої і сухої поверхні ґрунту. Піки на кривій  $K_e$  показують зростання випаровування, коли поверхня ґрунту зволожена зрошенням або опадами і  $E_c$  тимчасово підвищена. Ці піки випаровування з вологого ґрунту зменшуються з висиханням верхнього шару ґрунту. Піки зазвичай досягають максимальної величини 1,0-1,2, залежно від клімату, величини поливу і площі зволоженого ґрунту.



**Рисунок 4.8** – Криві коефіцієнта культури, що показує базове значення  $K_{cb}$  (широка лінія), випаровування з ґрунту  $K_e$  (вузька лінія) і крива  $K_c = K_{cb} + K_e$  (пунктирна лінія)

Сума  $K_{cb}$  і  $K_e$  дає єдиний коефіцієнт культури  $K_c$ . Загальна крива  $K_c$ , показана пунктирною лінією на рис. 4.8, ілюструє ефект осереднених в часі  $K_{cb} + K_e$  і є «зглаженою» кривою. Ця зглажена крива отримана в результаті розрахунку єдиного  $K_c$ . Крива  $K_c$  лежить вище кривої  $K_{cb}$  з потенційно великою різницею протягом початкового періоду і стадії розвитку рослин залежно від частоти зволоження.

Зміни в рослинності і ступені покриття ґрунту означають, що коефіцієнт  $K_c$  змінюється в різні періоди росту. Тенденції зміни  $K_c$  протягом періоду росту представлені кривою коефіцієнта культури. Для опису і побудови кривої коефіцієнта культури потрібні тільки три значення  $K_c$ :

- під час початкової стадії ( $K_{c,ini}$ ),
- стадії середини сезону ( $K_{c,mid}$ ),
- у кінці кінцевої стадії сезону ( $K_{c,end}$ ).

Додаток Ж містить типові значення  $K_{c,ini}$ ,  $K_{c,mid}$  і  $K_{c,end}$  для різних сільськогосподарських культур. Представлені коефіцієнти об'єднані в групи (тобто, дрібні овочі, бобові, злакові і т. д.), щоб допомогти визначити культуру в таблиці і для порівняння культур в рамках групи.

Зазвичай коефіцієнти однієї групи культур аналогічні, так як висота рослин, площа листя, покриття землі і управління водою схожі.

Коефіцієнти, що наведені в додатку Ж враховують вплив як транспірації, так і випаровування. Постійний вплив такої інтеграції в часі представляє середню частоту зволоження «стандартної» культури в типових умовах росту в зрошуваних посадках. Значення  $K_c$  початкової і стадії розвитку культур підлягають зміні під впливом частоти зволоження і, отже, значення, що використовується для  $K_c$ , повинні постійно уточнюватись. В результаті високої частоти зволоження, при дощуванні або атмосферних опадах значення  $K_c$  можуть суттєво збільшуватись.

Значення для  $K_{c,mid}$  і  $K_{c,end}$  в додатку Ж дані для напіввологого клімату з середньою щоденною мінімальною вологістю ( $RH_{mid}$ ) 45 % і помірною швидкістю вітру в середньому 2 м/с. В умовах більш вологого або аридного клімату, або в значно активних вітрових умовах коефіцієнти  $K_c$  в середині і в кінці сезону повинні бути модифіковані.

Значення  $K_c$  в в додатку Ж – це значення для культур, що не знаходяться в стресовому стані, культивуються в добрих агрономічних умовах, достатньому водоправлінні і досягненні максимального врожаю культур (стандартні умови). Там, де густина сходів, висота рослин або площа листя менше, ніж заплановано в подібних умовах, значення для  $K_{c,mid}$  для більшості культур і  $K_{c,end}$  необхідно модифікувати.

#### **4.11. Сумарне випаровування в умовах обмеженого зволоження**

В умовах зрошення, коли рослини не відчують мають нестачу ґрунтової вологи, сумарне випаровування в основному обумовлене тепловими ресурсами клімату. Зі зниженням ґрунтових вологозапасів сумарна витрата (водоспоживання) визначається не скільки тепловими, скільки ресурсами зволоження. При цьому ґрунт і рослини виступають як регулюючі фактори процесу водоспоживання.

Вперше на якісний взаємозв'язок випаровування з наявністю вологи в ґрунті вказав П.С. Косович, який висунув гіпотезу про трьохстадійність просихання ґрунту.

На першій стадії (умова необмеженого водопостачання) випаровування незначно залежить від змін вологи в ґрунті. При просиханні ґрунту, починаючи з деякої величини (верхній оптимум зволоження), випаровування переходить на другу стадію, зменшуючись зі змен-

шенням вологи. Після досягнення порівняно малої вологості ґрунту, випаровування переходить в третю стадію, повільно зменшуючись, до повного його висихання.

Пізніше ця закономірність була підтверджена С.І. Дольовим і в наш час не підлягає сумніву.

Б.В. Поляков (1946 р.) використав для розрахунку випаровування матеріали спостережень за ґрунтовими вологозапасами. Це дозволило йому знайти емпіричні зв'язки випаровування з метеорологічними факторами для умов надмірного і недостатнього зволоження, які були узагальнені у вигляді розрахункових графіків. Однак при розрахунках місячних величин сумарного випаровування названий метод дає незадовільні результати.

М.І. Будико (1987 р.), ґрунтуючись на генетичних рівняннях зв'язку Е.М. Ольдекопа, вивів формулу для визначення середньобагаторічної величини річного випаровування

$$E = \sqrt{\frac{R_0 x}{L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{R_0}{xL}\right) \right]} \frac{thxL}{R_0}, \quad (4.70)$$

де  $R_0$  – радіаційний баланс зволоженої поверхні, кал/см<sup>2</sup>;

$L$  – скрита теплота пароутворення, кал/г;

$x$  – атмосферні опади, мм.

Н.А. Багровим (1981 р.) запропонований метод для випаровування за місяцями з врахуванням температури і вологості повітря та зволоженості ґрунтів. В якості визначеного співвідношення між випаровуванням і зволоженням прийняте рівняння

$$E = E_0 \cdot \Phi\left(\frac{\bar{\omega}}{E_0, n}\right), \quad (4.71)$$

де  $E$  – сумарне випаровування, мм;

$\Phi\left(\frac{\bar{\omega}}{E_0, n}\right)$  – деяка функція, яка визначається співвідношеннями зволоження ( $\bar{\omega}$ ), випаровуваності ( $E_0$ ) і параметра  $n$ .

Метод Н.А. Багрова визначає крок в розвитку питання, що розглядається у виразі (4.71) достатньо правильно враховані фактори, що впливають на інтенсивність випаровування. Однак умовність, прийнята ним при виявленні величин зволоження за розрахунковий період, суттєво скоротила область застосування рівняння (4.71).

Для розрахунку сумарного випаровування всередині року при нестачі зволоження ґрунту М.І. Будико рекомендує формулу

$$E = \frac{E_0(W_1 + W_2)}{2W_K}, \quad (4.72)$$

де  $E_0$  – випаровуваність, мм;

$W_1, W_2$  – продуктивні вологозапаси на початку і кінці розрахункового періоду, мм;

$W_K$  – критичні величини продуктивних вологозапасів, мм.

Для тих же умов А.І. Булаговський пропонує залежність

$$E = b \cdot W \cdot E_0 + (1 - bW)\beta \cdot n, \quad (4.73)$$

де  $b = \frac{1}{W_K}$ ;

$\beta$  – кількість атмосферних опадів, затриманих рослинністю при випадінні кожного дощ;

$n$  – кількість дощів, що випали за розрахунковий період;

$W$  – загальні вологозапаси, мм.

Застосування комплексного методу, а також формули (4.72) обмежується тим, що в кожному конкретному випадку необхідно визначити критичну вологість ґрунту, що залежить не тільки від характеру ґрунту, але і від виду, фази розвитку і стану рослин. Крім того, в основі методу М.І. Будико покладено допущення про розрив безперервності випаровування із загальним зволоженням, так при  $W \geq W_K$  випаровування приймають рівним випаровуваності, а при  $W < W_K$ ,  $E$  визначають за формулою (4.72). Така апроксимація закону зміни сумарного випаровування при зміні загального зволоження недостатньо фіксована і дозволяє при розрахунках отримувати лише наближені результати.

В.С. Мезенцев розглядає зміни сумарного випаровування при зміні загального зволоження як єдиний неперервний процес, при якому за висушуванням ґрунту зменшується сумарне випаровування, а стадії підсихання визначаються ходом висихання. В загальному вигляді зв'язку сумарного випаровування і загального зволоження представлено таким чином :

$$E = E_m \cdot \left[ 1 + \left( \frac{kx + W_1 - W_2}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (4.74)$$



де  $E_m$  – сумарне випаровування з необмеженими запасами вологи;  
 $n$  – параметр, який визначають відношенням фактичного випаровування в умовах оптимальної вологозабезпеченості і максимально можливого випаровування.

Зв'язок сумарного випаровування із загальними вологозапасами ґрунту В.С. Мезенцев представив рівнянням:

$$E = E_m \cdot \left(1 + v_{сер}^{-r \cdot n}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4.75)$$

де  $v_{сер}$  – середня за розрахунковий період вологість активного кореневмісного шару ґрунту, частка від найменшої вологоємкості.

Параметр  $r$  визначають водно-фізичними властивостями ґрунту і він може бути визначений співвідношення

$$v_{MG} = \left(\frac{0,5^n}{r}\right)^{\frac{1}{r-1}}, \text{ або } v_{pk} = \left(\frac{r-1}{n \cdot r + 1}\right)^{\frac{1}{r-n}},$$

де  $v_{MG}$  – вологозапаси, частка від найменшої вологоємкості, які відповідають максимальній гігроскопічності;

$v_{pk}$  – вологість розриву капілярів, частка від НВ.

Наведені рівняння (4.74) і (4.75) дозволяють розрахувати місячні (декадні) величини сумарного випаровування і загальне зволоження як при природних умовах волого- і теплозабезпеченості, так і при оптимальних поєднаннях тепла і вологи, що дає можливість кількісно визначати розміри водних і теплових меліорацій.

Однак недоврахування виду і стану випаровуючої поверхні призводить до того, що питання про нормування зрошення і проектування режиму зрошення сільськогосподарських угідь приблизно вирішується. Цей метод добре застосовується при глибокому заляганні ґрунтових вод, при невиконанні цієї умови необхідно вводити відповідні корективи.

Для визначення величини сумарного водоспоживання за конкретні періоди часу може використовуватись метод С.І. Харченка – рівняння (4.14) і розрахункова схема О.Р. Константинова.

Рівняння (4.14) дозволяє розрахувати шукану величину сумарного випаровування і в умовах зрошення, і при недостатньому зволоженні. Використання коефіцієнта біологічної кривої водоспоживання, в даному випадку, викликає необхідність вирішення питання про йо-

го варіювання залежно від кліматичних умов вегетаційного періоду і, в першу чергу, від умов зволоження.

О.Р. Константинов величину фактичного водоспоживання різними культурами, при середніх вологозапасах в ґрунті, в даних кліматичних умовах знаходить за середньою інтенсивністю випаровування з поверхні луків, розрахованої за температурою і вологістю повітря, вимірними на метеостанціях, і коефіцієнтом, що дозволяє перейти від випаровування з луків до величини випаровування з культури. Складність полягає в тому, що значення таких коефіцієнтів повинні бути диференційованими за територією, культурами і в часі.

У закордонній практиці розрахунку сумарного випаровування в природних умовах найбільшою розповсюдження отримали формули Ф.Альбрехта, С. Улига і Л. Тюрка, а із більш ранніх робіт частіше за все в літературі згадуються графіки А.Ф. Мейера. Із перелічених методів в наш час заслуговує увагу метод Л.Тюрка, інші цікаві лише при розгляді історії питання.

Аналіз розрахунку методів визначення сумарного випаровування в умовах недостатнього зволоження показує, що при вирішенні задач в середньобагаторічному розрізі можуть застосовуватись теоретичні схеми М.І. Будико і В.С. Мезенцева, остання найбільш гнучка. При визначенні сумарного випаровування за конкретні періоди можуть використовуватись формула С.І. Харченка і метод О.Р. Костянтинова, однак для цього необхідно мати значення коефіцієнтів, що враховують вигляд і стан сільськогосподарських культур.

Під час розрахунку режиму зрошення сільськогосподарських культур методом ФАО при зниженні вологозапасів нижче порогового значення, вважають, що рослини зазнають водного стресу. Вплив водного стресу описується множенням базового коефіцієнта культури на коефіцієнт водного стресу  $K_s$ :

$$E_c = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot E_0. \quad (4.76)$$

В умовах водного стресу  $K_s < 1$ . При відсутності водного стресу  $K_s = 1$ .

$K_s$  описує вплив водного стресу на транспірацію рослин. При використанні одиничного коефіцієнта культури, вплив водного стресу об'єднується в  $K_c$  як:

$$E_{c,adj} = K_s \cdot K_c \cdot E_0. \quad (4.77)$$

Так як коефіцієнт водного стресу впливає тільки на транспірацію рослин, а не на випаровування з ґрунту, застосування  $K_s$ , тому вико-

ристовуючи рівняння (4.76), більш оправдано, ніж застосування рівняння (4.77). Однак в ситуації, де випаровування з ґрунту не є головним компонентом  $E_c$ , використання рівняння (4.77) забезпечує виважені результати.

Водовіддача визначається здатністю ґрунту утримувати воду, доступну рослинам. Після випадіння рясних опадів або зрошення ґрунт буде здійснюватись до досягнення найменшої вологоємкості.

Найменша вологоємкість (НВ) – це кількість води, яку добре осушений ґрунт повинен утримувати, незважаючи на гравітаційні сили, або кількість залишеної води при значно зниженому дренажі. При відсутності водоподачі вміст води в кореневій зоні знижується через її використання рослинами. Оскільки процес поглинання води прогресує, залишена вода утримується частинками ґрунту з більшою силою, знижуючи її потенціальну енергію і роблячи її важкодоступною кореням рослин. Кількість води, що затримується, стає нульовою при досягненні точки в'янення.

Точка в'янення – це вміст води, при якому рослини будуть в'янути.

Оскільки вологість вище НВ не може підтримуватись через гравітаційні сили, а вологість нижче точки в'янення не може бути забрана коренями рослин, загальна кількість води в кореневій зоні є різницею між вологістю при НВ і при точці в'янення:

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad (4.78)$$

де  $TAW$  – загальна кількість води в кореневій зоні ґрунту, мм;

$\theta_{FC}$  – вологість ґрунту при найменшій вологоємкості (НВ),  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$\theta_{WP}$  – вологість ґрунту при точці в'янення,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$Z_r$  – глибина кореневмісного шару ґрунту, м.

$TAW$  – це кількість води, яку рослини можуть спожити забрати із кореневої зони, а її величина залежить від типу ґрунту і глибини розповсюдження коріння. Межі максимальної ефективної глибини розповсюдження коренів для різних культур наведені в додатку К.

Хоча теоретично вода доступна до точки в'янення, але фактично споживання води рослинами скорочується перед досягненням точки в'янення. При достатньо зволоженому ґрунті, він постачає достатню кількість води у відповідності із потребою культури, тобто забір води дорівнює  $E_c$ . Коли вміст води в ґрунті знижується, вода стає важкодоступною для споживання. Коли вологість ґрунту нижче критичного значення, вода не може достатньо швидко надходити до коріння і відповідати вимогам транспірації, через що рослини починають відчу-

вати «стрес». Частка  $TAW$ , яку рослина може забрати із кореневої зони, не маючи водного «стресу», є легкодоступною водою:

$$RAW = p \cdot TAW, \quad (4.79)$$

де  $RAW$  – легкодоступна вода в кореневій зоні, мм;

$p$  – середня частка загальної кількості води ( $TAW$ ), яка може бути отримана із кореневої зони до водного стресу (зниженої  $T$ ), 0–1.

Значення  $p$  вказані в додатку К. Множник  $p$  різний для кожної культури. Множник  $p$  зазвичай змінюється від 0,30 для поверхневого коріння рослин при підвищених значеннях  $E_c$  (більше 8 мм/добу), до 0,70 для глибокого коріння при низьких значеннях  $E_c$  (менше 3 мм/добу). Значення 0,50 для  $p$  є стандартним для багатьох культур.

Множник  $p$  є функцією величини випаровування атмосфери. При низьких значеннях  $E_c$ , значення  $p$ , вказані в додатку К, вище, ніж при високих значеннях  $E_c$ . Для жаркої сухої погоди, коли значення  $E_c$  високі,  $p$  на 10–25 % нижче значень, що наведені в додатку К, а ґрунт залишається вологим, виникає стрес. При низькій евапотранспірації рослин  $p$  буде на 20 % більше вказаних значень. Часто для конкретного періоду росту використовується постійне значення  $p$ , а ніж поглинання. Численне наближення для уточнення  $p$  до значення  $E_c$  є  $p = p_{\text{дод.к}} + 0,04(5 - E_c)$ , де уточнене « $p$ » обмежене  $0,1 \leq p \leq 0,8$  і  $E_c$  – мм/добу. Вплив чисельного уточнення показано на рис. 4.9.

Поняття «толерантності» культур до водного стресу через функцію частки ( $p$ ) від  $TAW$  є не зовсім коректним. Фактично, на швидкість підйому вологи в кореневмісному шарі більше впливає рівень потенціальної енергії ґрунтової вологи (потенціал ґрунтової матриці і супутня гідравлічна провідність), а не вміст вологи. Оскільки потенціал ґрунтової матриці різних типів ґрунтів відповідає різному вмісту ґрунтової вологи, величина  $p$  залежить від типу ґрунтів. У загальному, можна стверджувати, що для ґрунтів з дрібною текстурою (глина) значення  $p$  із додатку К можуть бути зменшені на 5–10 %, а для ґрунтів зі значно крупнішою текстурою (пісок) вони можуть бути збільшені на 5–10 %.

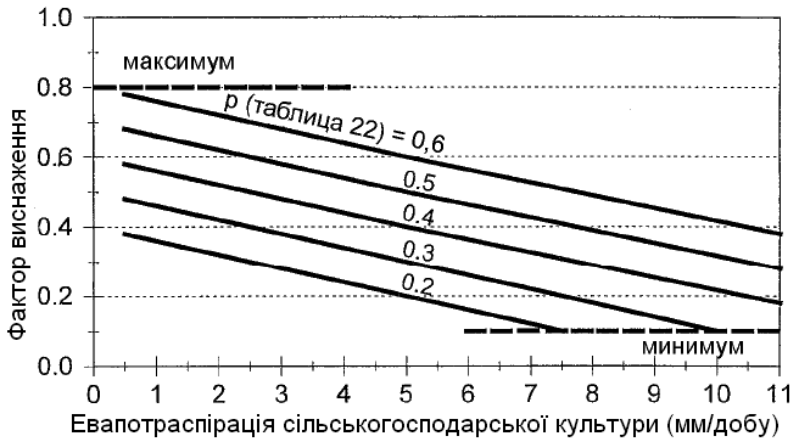


Рисунок 4.9 – Фактор виснаження для різних рівнів евапотранспірації сільськогосподарських культур

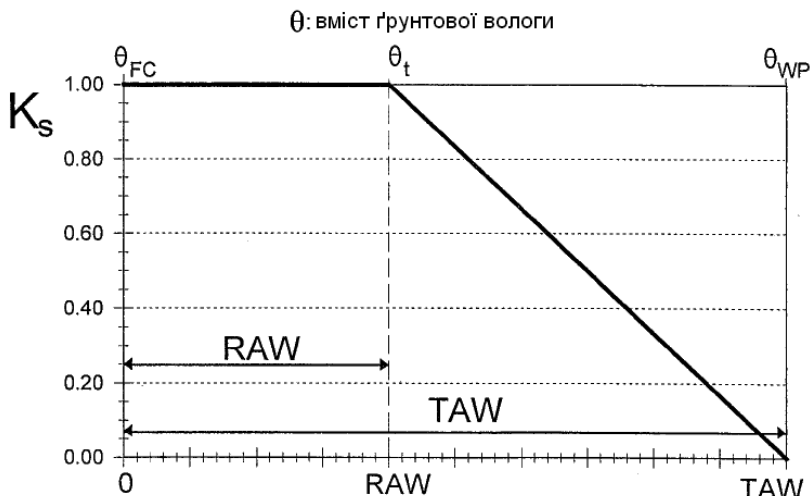
$RAW$  аналогічний допустимому управлінню виснаження ( $MAD$ ), введеному Мерріам (Allen, R.G. 1992). Однак величини для  $MAD$  знаходяться під впливом управління і економічних факторів, крім фізичних факторів, що впливають на  $p$ . Зазвичай,  $MAD$  менше  $RAW$ , якщо є сумніви в появі ризику, і  $MAD > RAW$ , якщо водний стрес рослин є невід’ємним елементом управління ґрунтовою вологою.

Вміст вологи в кореневій зоні може також виражатись виснаженням кореневої зони  $D_r$ , тобто її дефіцитом відносно найменшої вологості. В стані найменшої вологості виснаження кореневої зони дорівнює нулю ( $D_r=0$ ). При заборі ґрунтової вологи через евапотранспірацію виснаження призводить до стресу, коли  $D_r$  дорівнює  $RAW$ . Після того, як виснаження кореневої зони перевищить  $RAW$  (вміст вологи зменшується нижче порогу  $\theta_l$ ), воно стає достатньо високим, щоб обмежити евапотранспірацію нижче потенціальних величин і евапотранспірація культур розпочинає зменшуватись пропорційно об’єму вологи, що залишилась в кореневій зоні (рис. 4.10).

При  $D_r > RAW$   $K_s$  виражається таким чином:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1 - p)TAW}, \quad (4.80)$$

де  $K_s$  – безрозмірний фактор скорочення транспірації, що залежить від доступної ґрунтової вологи, 0–1,



**Рисунок 4.10 – Коефіцієнт водного стресу  $K_s$**

$D_r$  – виснаження кореневої зони, мм,

$TAW$  – загальна доступна ґрунтова волога в кореневій зоні, мм,

$p$  – частка  $TAW$ , яку культура може забрати із кореневої зони, не маючи водного стресу.

Після обчислення  $K_s$  корегування евапотранспірації  $E_c$  обчислюється за допомогою рівнянь (4.73) і (4.74), залежно від коефіцієнтів, які використовуються для опису евапотранспірації. Коли виснаження кореневої зони менше  $RAW$ ,  $K_s = 1$ .

## 4.12. Вплив засолення ґрунту на водоспоживання рослин (евапотранспірацію)

Солі в ґрунтовому розчині можуть зменшити евапотранспірацію, створюючи її недоступність для забору коренями рослин. Розчинені солі пов'язані з водою, тому для рослин потрібна додаткова сила, щоб забрати воду із засолених ґрунтів. Присутність солей в ґрунтовому розчині зменшує його повну потенціальну енергію. Крім того, деякі солі токсично впливають на рослини і можуть знизити метаболізм і ріст рослин.

Є дані досліджень, що врожайність культур і транспірація не настільки чутливі до низького осмотичного потенціалу, як до низького матричного потенціалу. В умовах засолення багато рослин можуть частково компенсувати низький осмотичний потенціал ґрунтової во-

логи формуванням більш високого вмісту розчинних речовин. Це відбувається шляхом адсорбування іонів із ґрунтового розчину і синтезуванням органічних *осмолітів*. Обидві ці реакції зменшують вплив осмотичного потенціалу на водовіддачу. Однак, синтез органічних осмолітів потребує затрат метаболічної енергії. Тому, ріст рослин часто затримується в умовах засолення. Це впливає на транспірацію через зменшення покриття рослинами поверхні землі і, крім того, іноді через часткове закриття продихів.

До інших впливів солей на ґрунт відносяться пряме натрієве і хлоридне отруєння і нестача поживних речовин. Це знижує процес розвитку рослин через зменшення ступеня подовження листків, розширення і розділення клітин в листі. Модальність залежить від методу зрошення. При дощуванні адсорбція натрію і хлориду через листок може створити токсичні умови для всіх різновидів культур. При самопливно-поверхневому або краплинному зрошенні пряма токсичність зазвичай виникає тільки на виноградниках або деревах; однак, високий рівень натрію може викликати нестачу кальцію у всіх культур.

Так як концентрація солей змінюється зі зміною вмісту ґрунтової вологи, засолення ґрунту зазвичай вимірюється і виражається на основі електричної провідності насиченої витяжки ґрунту ( $EC_e$ ).  $EC_e$  визначається як електрична провідність ґрунтового розчину після додавання дистильованої води, достатньої для приведення вмісту ґрунтової вологи до насичення.  $EC_e$  зазвичай вимірюється в *децисіменсах* на метр (дСм/м). При оптимальних умовах управління врожайністю культур залишається на потенціальному рівні, доки не буде досягнута *певна порогова електрична провідність насиченої витяжки ґрунтової вологи* ( $EC_{e,threshold}$ ). Якщо середня  $EC_e$  кореневої зони стає вище даної критичної порогової величини, передбачається, що врожайність розпочинає знижуватись пропорційно збільшенню засолення. Ступінь зниження врожайності зі збільшення засолення зазвичай виражається як похил  $b$ , що вимірюється в зменшенні врожайності (%) на збільшення  $EC_e$  (дСм/м).

---

**Сіменс (См, S)** — одиниця вимірювання електричної провідності в Міжнародній системі одиниць (SI). Одиниця сіменс входить до групи похідних одиниць SI, що мають спеціальну назву та позначення.

1 См дорівнює електричній провідності провідника з електричним опором 1 Ом.

$$1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1} = 1 \text{ А/В} = 1 \text{ м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2.$$

---

Всі рослини неоднаково реагують на засолення; деякі культури можуть давати прийнятну врожайність при достатньо високому рівні засоленості ґрунту. Це пояснюється тим, що деякі культури можуть краще регулювати осмотичні умови, тобто це дозволяє їм забирати більше води із засоленого ґрунту, або вони могли бути більш стійкі до деяких із токсичних дій засолення.

Із додатку Л видно, що діапазон солестійкості сільськогосподарських культур змінюється в 8–10 разів. Отже, вплив засоленості ґрунтів на врожайність і евапотранспірацію культур залежить від кожної культури окремо.

Параметри  $EC_{e,threshold}$  і  $b$  були визначені в експериментальних дослідженнях, головним чином, з використанням стабільного зрошення, при якому вміст ґрунтової вологи підтримується на рівні, близькому до найменшої вологоємкості. Однак, при різних графіках зрошення для дощування і самопливно-поверхневого зрошення вміст ґрунтової вологи зазвичай значно нижче найменшої вологоємкості. Таким чином,  $EC$  ґрунтового розчину  $EC_{sw}$  підвищується до зрошення, незважаючи на те, що  $EC$  насиченої витяжки не змінюється.

Підвищена концентрація солей в ґрунтовому розчині зменшує осмотичний потенціал ґрунтового розчину (він стає негативним), таким чином, що рослини повинні витратити більше метаболічної енергії і механічної сили для абсорбції води. Крім того, метаболічний і токсичний вплив солей на рослини може стати більш явно вираженим в процесі висушування ґрунту і збільшення концентрації солей. Однак зміни у вмісті ґрунтової вологи під час міжполивного періоду не впливають значно на евапотранспірацію культур. Це пояснюється збільшенням вмісту ґрунтової вологи до рівнів, що знаходяться вище спостережених при стабільному зрошенні на початку тривалого міжполивного інтервалу. Пізніше, під час тривалого міжполивного періоду, відбувається аналогічне нейтралізуюче зменшення вмісту ґрунтової вологи. Крім цього, розподіл солей в кореневій зоні при не частому зрошенні може зменшити вплив засолення в першій частині міжполивного періоду. При частому зрошенні втрати через випаровування з ґрунту вище.

Отже, при тій же поливній нормі частка вилуження зменшується. З цих причин тривалість міжполивного періоду і зміни  $EC$  ґрунтової вологи під час міжполивного періоду зазвичай не є факторами зменшення  $E$ , за умови, що однакові об'єми води просочуються в кореневу зону протягом тривалого часу.



У деяких випадках, збільшення випаровування при частому зрошенні може нейтралізувати зменшення  $K_c$ , викликане високим  $EC_e$  кореневої зони. В цих умовах сумарне  $K_c$  і  $E_c$  не значно відрізняються від стандартних умов без засолення при менш частому зрошенні, навіть якщо врожайність культур і евапотранспірація зменшуються. З цієї ж причини в умовах засолення зменшуючий фактор  $K_c$  повинен застосовуватись тільки використанням методу на підставі подвійного  $K_c$ . В статтях про вплив засолення ґрунту на виробництво сільськогосподарських культур Леті і Шелхевет (Richard G. 1995) прийшли до висновку, що засолення ґрунту і водний стрес зазвичай доповнюють один одного при впливі на евапотранспірацію культур. Тому, одні і ті ж функції зв'язку врожайності –  $E$  розповсюджуються як на стрес, викликаний дефіцитом води, так і на стрес, викликаний засоленням.

В даному методі мають на увазі, що при оптимальних умовах управління урожайності культур залишається на потенційному рівні, доки не буде досягнута певна порогова електрична провідність ґрунтового розчину. Коли засолення стає вище цього порогу, передбачається, що врожайність культур знижується пропорційно росту засолення. Мінералізація ґрунтової вологи виражається через електричну провідність насиченої витяжки,  $EC_e$ . В формулі це має такий вигляд:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (EC_e - EC_{e,threshold}) \frac{b}{100}, \quad (4.81)$$

коли  $EC_e > EC_{e,threshold}$ ,

де:  $Y_a$  – фактична врожайність культури;

$Y_m$  – максимальна потенційна врожайність при  $EC_e < EC_{e,threshold}$ ;

$EC_e$  – середня електрична провідність насиченої витяжки із кореневої зони, дСм/м;

$EC_{e,threshold}$  – електрична провідність насиченої витяжки на порозі  $EC_e$ , коли врожайність сільськогосподарської культури стає нижче  $Y_m$ , дСм/м;

$b$  – скорочення врожайності зі збільшенням  $EC_e$ , %/(дСм·м).

Значення  $EC_{e,threshold}$  і  $b$  дані в додатку Л для більшості сільськогосподарських культур.

Дані засолення-врожайність в основному були отримані з досліджень, коли вміст ґрунтової вологи був на потенціалі –3 м (30 кПа) або вище на глибині 0,3–0,6 м залежно від виду сільськогосподарської культури. Однак, в даних вказується, що для більшості сільськогосподарських культур ці дані можна переносити на типові польові

умови, де легкодоступна ґрунтова волога ( $RAW$ ) зменшується між поливами.

В збірниках праць ФАО була введена проста лінійна функція «сільськогосподарська культура – вода» для прогнозування зниження врожайності, коли «стрес» сільськогосподарської культури спричинений дефіцитом ґрунтової вологи:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{E_{c,adj}}{E_c}\right), \quad (4.82)$$

де  $K_y$  – фактор залежності врожайності;

$E_{c,adj}$  – скорегована (фактична) евапотранспірація сільськогосподарської культури, мм/добу;

$E_c$  – евапотранспірація сільськогосподарської культури для стандартних умов (відсутність водного стресу), мм/добу.

$K_y$  – це фактор, який описує зниження відносної врожайності зі зменшенням  $E_c$ , викликаний дефіцитом ґрунтової вологи.  $K_y$  має певні значення для кожної сільськогосподарської культури і вони можуть змінюватись протягом вегетаційного сезону. Зазвичай спад врожайності внаслідок дефіциту вологи в період вегетації і досягання відносно невеликий, а в період квітування і формування плодів врожайність значно зменшується. Значення  $K_y$  для окремих періодів росту і для всього вегетаційного сезону відображені в табл. 4.8.

**Таблиця 4.8 – Функції сезонної залежності врожайності**  
(збірник ФАО № 33)

Сільськогосподарська культура	$K_y$	Сільськогосподарська культура	$K_y$
Люцерна	1,1	Картопля	1,1
Боби	1,15	Сорго	0,9
Капуста	0,95	Соя	0,85
Цитрусові	1,1-1,3	Пшениця яра	1,15
Бавовник	0,85	Буряк цукровий	1,0
Виноград	0,85	Соняшник	0,95
Кукурудза	1,25	Томат	1,05
Цибуля	1,1	Кавун	1,1
Горох	1,15	Пшениця озима	1,05
Перець	1,1		

При застосуванні моделі впливу засолення на сумарне випаровування в працях ФАО розглядають два випадки:

Відсутність водного стресу ( $D_r < RAW$ ). Коли засолення виникає при відсутності водного стресу, рівняння (4.81) і (4.82) можуть бути скомбіновані і вирішені для еквіваленту  $K_s$ , де  $K_s = \frac{E_{c,adj}}{E_c}$  (Allen R.G. 1992):

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e,thresh}) \quad (4.83)$$

в умовах, коли  $EC_e > EC_{e,thresh}$  і виснаження ґрунтової вологи менше рівня легкодоступної вологи ( $D_r < RAW$ ).  $D_r$  і  $RAW$  визначені в попередньому параграфі.

Наявність водного стресу ( $D_r > RAW$ ). Коли, крім засолення, виникає стрес ґрунтової вологи, (рівняння 4.80) із п.4.11 і рівняння (4.81) та (4.82) комбінуються в наступний вираз (Allen R.G. 1992):

$$K_s = \left[ 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e,thresh}) \right] \left( \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right), \quad (4.84)$$

для умов, коли  $EC_e > EC_{e,threshold}$  і  $D_r > RAW$ . На рис. 4.11 показано вплив зменшення засолення на  $K_s$  з ростом вологозапасів. Необхідно відмітити, що даний підхід передбачає, що  $RAW$  (і  $p$ ) не змінюються з ростом засолення. Для деяких сільськогосподарських культур це не завжди є достатнім припущенням.

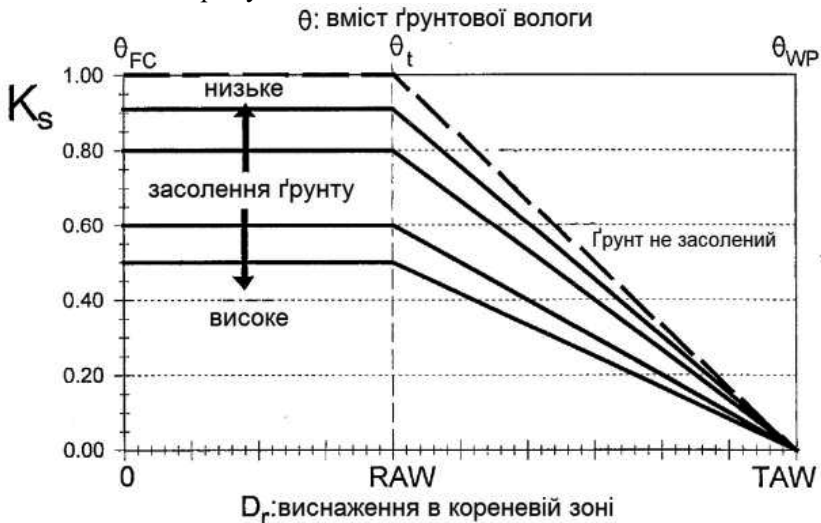


Рисунок 4.11 – Вплив засолення на коефіцієнт водного стресу  $K_s$

Оскільки вплив засолення на ріст рослин, урожайність і евапотранспірацію сільськогосподарської культури є інтегрованими у часі процесом, для прогнозування зменшення евапотранспірації зазвичай використовується тільки сезонне значення  $K_y$  (див. табл. 4.8). Для багатьох сільськогосподарських культур сезонне  $K_y$  приблизно дорівнює 1. Для сільськогосподарських культур з невідомим  $K_y$  в рівняннях (4.83) і (4.84) можна використовувати  $K_y = 1$  або можна вибрати  $K_y$  для схожої сільськогосподарської культури.

Рівняння (4.83) і (4.84) можна використовувати тільки для приблизної оцінки впливу засолення на  $E$ , і показують загальний вплив засолення на евапотранспірацію, що виникає протягом тривалого періоду часу (який вимірюється тижнями або місяцями). Ці рівняння не є точними для прогнозування  $E_c$  для певних днів. Вони також не включають інші впливи, як наприклад токсичність іонів. Застосування цих рівнянь передбачає, що  $EC_e$  представляє середнє значення  $EC_e$  для кореневої зони.

Дані рівняння можуть бути недійсні при високому ступені засолення, де лінійні залежності між  $EC_e$ , врожайністю сільськогосподарської культури і  $K_s$  не можуть бути використані. Використання рівняння (4.83) і (4.84) зазвичай обмежується  $EC_e < EC_{e,threshold} + 50/b$ . Крім того, рівняння передбачають  $Y_a = 0$  до того, як  $K_s = 0$  коли  $K_y > 1$  і навпаки.

Як вказувалось раніше, зменшення  $E_c$  при засолених ґрунтах частково викликане малим розміром рослини і часток покриття землі рослинним покривом. Ці ефекти в основному включені в коефіцієнтні величини в додатку Л. Тому там, де на ріст рослин впливає засолення і застосовуються рівняння (4.83) і (4.84), інші обмеження  $K_c$  не потрібні, наприклад, використання  $LAI$  або частки покриття землі рослинним покривом, як описано в п.4.13.

В умовах стійкого стану величина  $EC_e$  може бути визначена як функція від  $EC$  зрошувальної води ( $EC_{iw}$ ) і частки вилуговування з використанням стандартної формули вилуговування. Наприклад, формула вилуговування

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e - EC_{iw}}, \quad (4.85)$$

визначає потребу в промивці, коли до зрошення відсоткове співвідношення відібраної води від верхньої до нижньої чверті кореневої

зони складає приблизно 40–30–20–10 %.  $EC_{iw}$  є електричною провідністю зрошувальної води. Із цього рівняння  $EC_e$  оцінюється у вигляді:

$$EC_e = \frac{1+LF}{LF} \cdot \frac{EC_{iw}}{5}, \quad (4.86)$$

де  $LF$  – фактична частка вилуговування, яка використовується замість  $LR$  – потреба в промивці.

Рівняння (4.86) визначає  $EC_e=1,5EC_{iw}$  в умовах, коли використовується 15–20 % частка вилуговування. Виходячи із місцевих характеристик, замість рівняння із збірника ФАО № 29 можуть бути використані інші рівняння для частки вилуговування. Рівняння (4.86) є вірним тільки в тому випадку, коли якість зрошувальної води і частка вилуговування залишаються постійними протягом всього вегетаційного сезону. Для досягнення сольової рівноваги в ґрунті необхідний час. Якщо взимку йдуть дощі (і опади з водою високої якості) і часто проводиться добра промивка, то сольовий баланс ґрунту буде відповідати іншим на початку сезону і середня  $EC_e$  кореневої зони буде нижче величини, визначеної із рівняння (4.86). В цих особливих умовах бажане відповідне місцеве тарування рівняння (4.86).

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Що таке сумарне водоспоживання сільськогосподарських культур?*
- 2. З яких елементів складається сумарне водоспоживання? Як вони впливають на формування врожаю?*
- 3. В чому сутність розрахунку сумарного водоспоживання методом О.М. Костякова?*
- 4. Що називають коефіцієнтом водоспоживання? Яка його розмірність?*
- 5. Чим транспіраційний коефіцієнт відрізняється від коефіцієнту водоспоживання?*
- 6. Яким чином враховують погодні умови і особливості культури в біокліматичному методі визначення сумарного водоспоживання?*
- 7. Яким чином встановлюється біокліматичний коефіцієнт для кожної сільськогосподарської культури?*
- 8. Як ведеться розрахунок сумарного водоспоживання удосконаленим біокліматичним коефіцієнтом В.П. Остапчика?*
- 9. Як враховують погодні умови при розрахунку сумарного водоспоживання удосконаленим біокліматичним методом В.П. Остапчика?*
- 10. За яких умов застосовують біофізичний метод Д.А. Штойка при розрахунку сумарного водоспоживання сільськогосподарських культур?*

11. Як враховують особливості росту і розвитку культур при розрахунку їх сумарного водоспоживання біофізичним методом Д.А. Штойка?
12. Яким чином розраховують сумарне водоспоживання комплексним (тепловоднобалансовим) методом С.І. Харченка?
13. Що таке водний еквівалент випаровування у визначенні сумарного випаровування методом В.С. Мезенцева?
14. Яким чином здійснюють розрахунок інтенсивності випаровування з ґрунту методом О.Р. Констянтинова?
15. В чому сутність розрахунку сумарного випаровування сільськогосподарською культурою методом ФАО?
16. Що є еталонною поверхнею при розрахунку евапотранспірації методом ФАО?
17. Які параметри застосовують при розрахунку еталонної евапотранспірації за формулою Пенмана-Монтейна?
18. Яким чином переходять від еталонної евапотранспірації до евапотранспірації конкретної культури?
19. З яких етапів складається період вегетації конкретної культури і як для них визначаються перехідні (біологічні) коефіцієнти?
20. Яким чином застосовують метод подвійного коефіцієнта культури при розрахунку евапотранспірації? За яких умов цей метод доцільний?
21. Яким чином ведуть розрахунок сумарного випаровування за умов обмеженого зволоження?
22. Що таке коефіцієнт водного стресу при розрахунку евапотранспірації?
23. Який вплив на водоспоживання рослин чинить засолення ґрунту?

## 5. ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СУМАРНЕ ВОДОСПОЖИВАННЯ

При розрахунках сумарного водоспоживання використовують різні метеорологічні величини, що стосуються водного і теплового режимів досліджуваної території. Але не на всіх метеорологічних станціях і постах вимірюють потрібні метеорологічні величини, тому виникає питання про їх визначення через інші величини. Отже, в цьому розділі розглядаються питання з визначення потрібних метеоданих і можливість їх перерахунку.

### 5.1. Місцеположення

Висота над рівнем моря (м) і широта розташування, досліджуваної площі (градуси пн. ш. або пд. ш.) повинні бути уточнені й чітко вказані. Ці дані потрібні для приведення метеорологічних даних до місцевого середнього значення атмосферного тиску (функції від висоти над рівнем моря) і розрахунку позаземної радіації ( $R_a$ ), а в деяких випадках – години денного світла ( $N$ ). В розрахунках  $R$  і  $N$  широта виражена в радіанах (тобто десятичних часових градусах  $\pi/180$ ).

Додатне значення використовують для північної півкулі, від'ємне – для південної.

Якщо розглядати територію України, то крайні точки мають таку широту:

- північна точка Грем'яч Новгород-Сіверського району Чернігівської області ( $52^{\circ}20'04''$  пн. ш.) (урочище Петрівське);
- південна точка – мис Сарич в Севастополі ( $44^{\circ} 23' 11''$  пн. ш. );
- м. Дніпро –  $48^{\circ} 28' 00''$  пн. ш.

### 5.2. Сонячна радіація

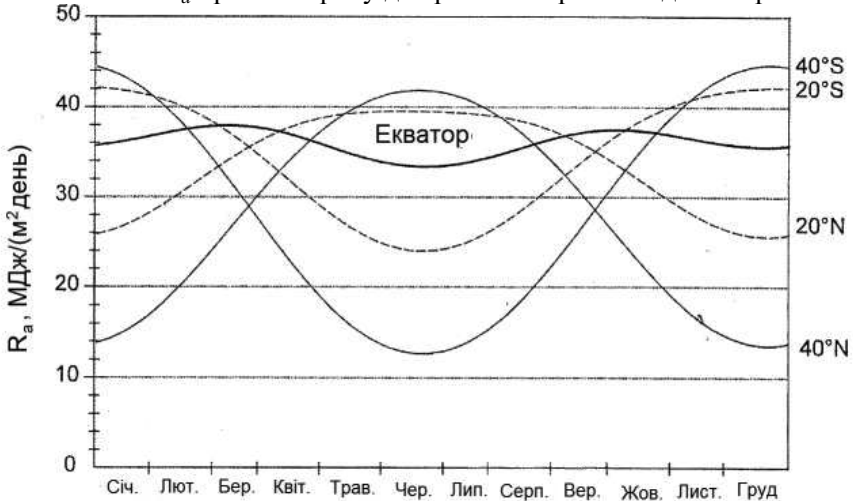
Процес сумарного водоспоживання визначається наявною для випаровування води кількістю енергії. Сонячна радіація є основним джерелом енергії, здатним перетворювати велику кількість води у пар. Потенційна кількість радіації, здатна досягти випарної поверхні, визначається положенням цієї поверхні і порою року. Відповідно з положенням Сонця потенційна радіація відрізняється для різних широт і різних сезонів. Реальна сонячна радіація, що досягає випарної поверхні, залежить від запиленості атмосфери і наявності хмарності, які відображають і поглинають більшу частину радіації. Оцінюючи вплив сонячної радіації на евапотранспірацію, необхідно мати на ува-

зі, що не вся наявна енергія використовується для випаровування води. Частина сонячної енергії використовується для нагріву атмосфери і ґрунтового профілю.

**Позаземна радіація ( $R_a$ )**

Радіація, перпендикулярна до поверхні земної атмосфери, називається сонячною постійною і дорівнює приблизно  $0,082 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{хв})$ . Місцева інтенсивність радіації, однак, визначається кутом між напрямком сонячних променів і перпендикуляром до поверхні атмосфери. Цей кут буде змінюватись протягом дня і буде відрізнятись для різних широт і сезонів року. Сонячна радіація, отримана на поверхні атмосфери на горизонтальній площині, називається неземною (сонячною) радіацією  $R_a$ .

Якщо Сонце стоїть прямо над головою, кут падіння дорівнює нулю, а позаземна радіація –  $0,082 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{хв})$ . При зміні сезонів року положення Сонця, довгота дня і, отже,  $R_a$  також змінюються. Позаземна радіація є, таким чином, функцією широти, дати і часу доби. Додаткові значення  $R_a$  протягом року для різних широт наведені на рис. 5.1.



**Рисунок 5.1 – Річна мінливість неземної радіації ( $R_a$ ) на екваторі і  $20^\circ$  та  $40^\circ$  північної і південної широти**

**Сонячна або короткохвильова радіація ( $R_s$ )**

Оскільки радіація проникає через атмосферу, частина її губиться, відбита або поглинута атмосферними газами, водою та пилом. Кількість радіації, що сягає горизонтальної площини, відома як сонячна



радіація  $R_s$ . Оскільки Сонце випромінює енергію у вигляді електромагнітних хвиль, що характеризуються як короткі хвилі, сонячна радіація також відноситься до короткохвильової.

Для безхмарного дня  $R_s$  дорівнює, приблизно 75 % від позаземної радіації. В хмарну погоду атмосфера поглинає радіацію, однак, навіть в найбільш хмарні дні радіація складає не менше 25 % у вигляді розсіяної радіації. Сонячна радіація також відома як глобальна радіація, маючи на увазі, що вона дорівнює сумі прямої короткохвильової радіації Сонця і дифузійної радіації із всіх верхніх кутів.

### ***Відносна короткохвильова радіація ( $R_s/R_{so}$ )***

Відносна короткохвильова радіація – це відношення сонячної радіації ( $R_s$ ) до сонячної радіації в безхмарний день ( $R_{so}$ ).  $R_s$  – це сонячна радіація, яка сягає поверхні Землі за даний період, тоді як  $R_{so}$  – це сонячна радіація, яка сягає поверхні Землі лише в безхмарні дні.

Відносна короткохвильова радіація є засобом вираження хмарності атмосфери: якщо хмарність має підвищену щільність, то менше відношення, яке змінюється в межах від 0,33 (щільно похмуро) до 1 (ясно). При відсутності прямих вимірювань  $R_n$  відносна короткохвильова радіація використовується для розрахунків довгохвильової радіації.

### ***Відносна тривалість сонячного сйва ( $n/N$ )***

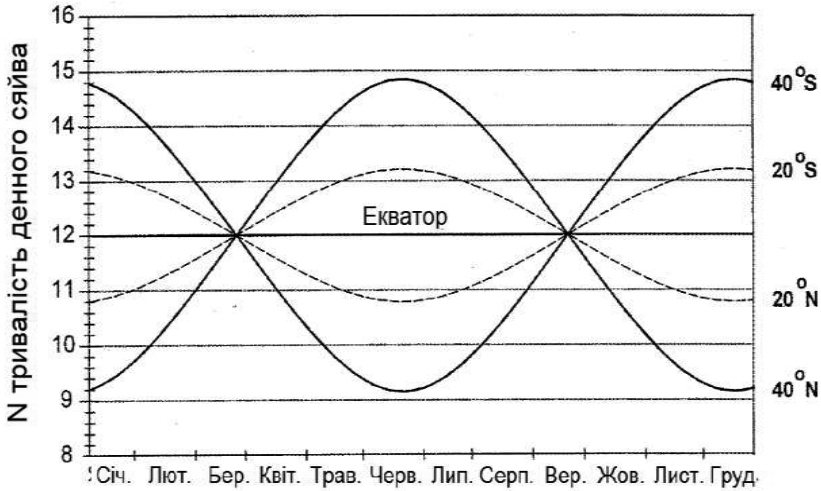
Відносна тривалість сонячного сйва є ще одним відношенням, яке відображає хмарність атмосфери. Це відношення реальної тривалості сонячного сйва  $n$  до максимально можливої тривалості сонячного сйва, або годин денного світла  $N$ . При відсутності хмарності реальна тривалість сонячного сйва дорівнює годинам денного світла ( $n=N$ ) і відношення дорівнює 1, тоді як в хмарні дні  $n$  а, отже, і відношення, можуть дорівнювати нулю. В умовах прямих вимірювань  $R_s$  відносну тривалість сонячного сйва  $n/N$  часто використовують для отримання сонячної радіації із неземної радіації.

У випадку позаземної радіації тривалість дня  $N$  залежить від положення Сонця і вона є функцією широти і дати. Денні значення  $N$  протягом року для різних широт наведені на рис. 5.2.

### ***Альbedo ( $\alpha$ ) і чиста сонячна радіація ( $R_{ns}$ )***

Значна кількість сонячної радіації, сягає земної поверхні, відбивається від неї. Частина  $\alpha$  сонячної радіації, відбита поверхнею, називається альbedo. Альbedo значно змінюється для різних поверхонь і кута падіння або градієнту земної поверхні. Воно може досягати 0,95

для «свіжого» снігу, бути незначним (0,05) для вологого голого ґрунту. Земний рослинний покрив має альbedo 0,20–0,25. Для еталонної трав'яної поверхні значення альbedo приймають рівним 0,23.



**Рисунок 5.2 – Річна мінливість тривалості денного сйва (N) на екваторі, 20° і 40° північної і південної широти**

Чиста сонячна радіація  $R_{ns}$  є частиною сонячної радіації  $R_s$ , яка не відбивається від поверхні. Її значення дорівнює  $(1-\alpha)R_s$ .

**Чиста довгохвильова радіація (Rnl)**

Сонячна радіація, поглинута Землею, перетворюється в теплову енергію. Через певні процеси, включаючи випромінювання радіації, Земля втрачає цю енергію. Земля, яка має значно більш низьку температуру, ніж Сонце, випромінює радіоактивну енергію через довгі хвилі більше ніж Сонце. Отже, земна радіація відноситься до довгохвильової радіації. Випромінена довгохвильова радіація ( $R_{nl,up}$ ) поглинається атмосферою або губиться в космосі. Довгохвильова радіація, отримана атмосферою ( $R_{nl,down}$ ), підвищує її температуру і, як наслідок, атмосфера випромінює власну енергію, як показано на рис. 5.3. Частина радіації знаходить шлях назад до поверхні Землі. Отже, земна поверхня як випромінює, так і отримує довгохвильову радіацію. Різниця між висхідною і низхідною радіацією називається чистою довгохвильовою радіацією  $R_{nl}$ . Так як висхідна довгохвильова радіація майже завжди більше низхідної,  $R_{nl}$  то вона вказує на втрати енергії.

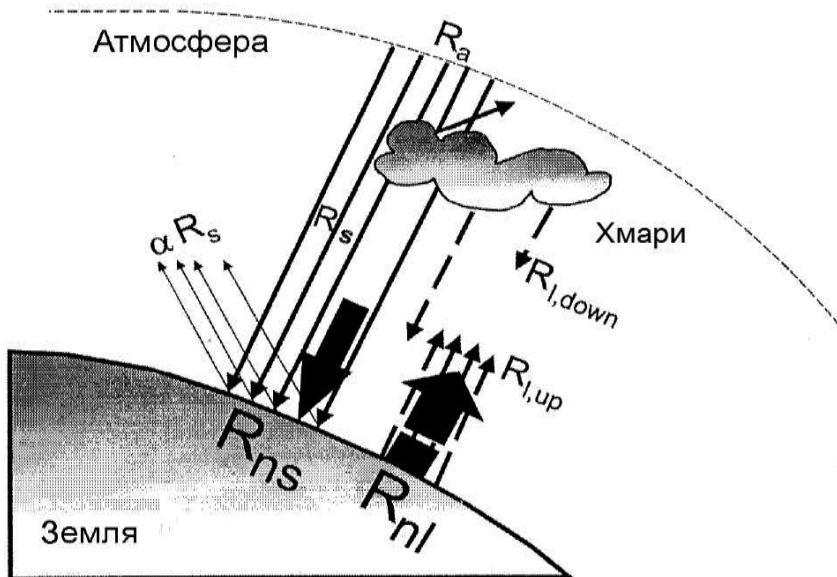


Рисунок 5.3 – Різні компоненти радіації

### Чиста радіація ( $R_n$ )

Чиста радіація  $R_n$  – це різниця між радіацією, що надходить і випромінюється, як короткохвильовою, так і довгохвильовою. Існує баланс між поглинутою енергією, відбитою і випроміненою земною поверхнею або різниця між чистою короткохвильовою, що надійшла ( $R_{ns}$ ), і чистою довгохвильовою радіацією, що випромінювалась ( $R_{nl}$ ), (див. рис. 5.3).  $R_n$  зазвичай додатна протягом денного часу і від’ємна в нічний час. Добові значення  $R_n$  за період в 24 години майже завжди додатні, за винятком екстремальних умов на високих широтах.

### Потік ґрунтового тепла ( $G$ )

Визначаючи евапотранспірацію, необхідно розглядати всі компоненти енергетичного балансу. Потік ґрунтового тепла ( $G$ ) – це енергія, що використовується в нагріванні ґрунту.  $G$  додатне, коли ґрунт нагрівається і від’ємне, коли він охолоджується. Хоча потік ґрунтового тепла невеликий в порівнянні з  $R_n$  і може бути проігнорований, кількість енергії, що отримує і віддає ґрунт в цьому процесі, теоретично повинне бути додане або відняте із  $R_n$  при визначенні евапотранспірації.

## Одиниці виміру

Стандартною одиницею, що використовується для вираження енергії, яку отримує одиниця поверхні за одиницю часу, є мегаджоуль на квадратний метр за добу (МДж/(м<sup>2</sup>·добу)). В метеобюлетенях можуть бути використані інші одиниці, радіація може бути виражена навіть в одиницях, які не вживаються зараз в стандарті системи СІ, таких, як калорія на см<sup>2</sup> за добу.

У рівнянні Пенмана-Монтейта (4.66) радіація, виражена в МДж/(м<sup>2</sup>·добу), перетворюється у еквівалентне випаровування в мм/добу з використанням перетворюючого фактору, що дорівнює величині, зворотній прихованому теплу пароутворення ( $1/\lambda = 0,408$ ):

Еквівалентне випаровування [мм/добу]=0,408 радіація [МДж/(м<sup>2</sup>·добу)].

### Приклад 5.1. Перерахунок енергії в еквівалентне випаровування

Перерахунок енергії в стовп води або навпаки здійснюють за формулою:

$$\text{Радіація}[\text{стовп води}] = \frac{\text{Радіація}[\text{енергія / поверхня}]}{\lambda \cdot \rho_w}, \quad (5.1)$$

де  $\lambda$  – скрита теплота пароутворення, МДж/кг;

$\rho_w$  – щільність води, тобто 1000 кг/м<sup>3</sup>;

[стовп води] виражається в м;

[енергія/поверхня] виражається в МДж/м<sup>2</sup>.

Використовуючи одну величину 2,45 МДж/(м<sup>2</sup>·добу) для  $\lambda$  і помноживши на 1000, щоб отримати мм, маєм:

$$\text{Радіація}[\text{мм / добу}] = \frac{\text{Радіація} \left[ \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \text{ добу}} \right]}{2,45} = 0,408 \cdot \text{Радіація} \left[ \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \text{ добу}} \right].$$

Одиниці, які використовуються для позначення енергії, що отримує одиниця поверхні за одиницю часу, і перетворюючі фактори наведені в табл. 5.1.

**Таблиця 5.1 – Перетворюючі фактори для радіації**

	Коефіцієнт переведу енергії, отриманої одиниці поверхні за одиницю часу				Еквівалентне випаровування
	МДж/(м <sup>2</sup> ·добу)	МДж/(см <sup>2</sup> ·добу)	кал/(м <sup>2</sup> ·добу)	Вт/м <sup>2</sup>	мм/добу
1 МДж/(м <sup>2</sup> ·добу)	1	100	23,9	11,6	0,408
1 кал/(м <sup>2</sup> ·добу)	0,041868	4,1868	1	0,485	0,0171
1 Вт/м <sup>2</sup>	0,0864	8,64	2,06	1	0,035
1 мм/добу	2,45	245	58,5	28,4	1

## **Вимірювання радіації**

Сонячна радіація може бути виміряна піранометрами, радіометрами або соляриметрами. Інструменти містять сенсор, який встановлений на горизонтальній площині і вимірюють інтенсивність сумарної сонячної радіації, тобто як прямої, так і розсіяної, наявної хмарності. Сенсор часто захищений і зберігається в сухій атмосфері під спеціальним скляним ковпаком, який повинен постійно протиратись і міститись в чистому вигляді.

Чиста короткохвильова і чиста довгохвильова радіація може бути виміряна визначенням різниці в показаннях сенсорів, обернених вверх і вниз. В чистому радіометрі скляний ковпак замінений поліетиленовим, який має діапазон передачі, як для короткохвильової, так і для довгохвильової радіації. Там, де немає піранометра, радіацію зазвичай визначають за тривалістю сонячного сьйва. Фактична тривалість сонячного сьйва  $n$  вимірюють реєстратором *Кемпбелла-Стокса*. Цей інструмент записує періоди сонячного сьйва з використанням скляної кулі, яка діє як лінза. Сонячні промені концентруються в фокусі, пропалюючи отвір в спеціально обробленій картці, встановленій концентрично зі сферою. Рух Сонця змінює положення фокусу протягом дня і залишає слід на картці. Якщо Сонце затінене, слід переривається. Години яскравого сонячного сьйва фіксуються довжиною сегментів.

Кількість тепла, що потрапляє до ґрунту,  $G$ , може бути виміряне системою термопар або термисторів.

### **Процедури розрахунку**

**Позаземна радіація для денного періоду ( $R_a$ )** для кожного дня року і різних широт може бути визначена із сонячної постійної, сонячного нахилу (кута падіння променів) і пори року:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r \{ \omega_s \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cos[\delta \cdot \cos(\omega_s)] \}, \quad (5.2)$$

де  $R_a$  – позаземна радіація, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$G_{sc}$  – сонячна постійна = 0,0820 МДж/(м<sup>2</sup>·хв.);

$d_r$  – зворотна відносна відстань Земля-Сонце (рівняння 5.4);

$\omega_s$  – кут на заході, рад (рівняння 5.6);

$\varphi$  – широта, рад (рівняння 5.3);

$\delta$  – сонячний нахил, рад (рівняння 5.5).

Значення позаземної радіації для кожного місяця різних широт земної кулі наведені в додатку М.

$R_a$  виражається в МДж/(м<sup>2</sup>·добу). Відповідне еквівалентне випаровування в мм/добу отримують перемноженням  $R_a$  на 0,408 (рівняння 5.1). Широта  $\varphi$  виражається в радіанах і є додатною для північної півкулі і від'ємною – для південної. Перетворення із десятичних градусів в радіани здійснюють за формулою:

$$[\text{Радіани}] = \frac{\pi}{180} [\text{десятинні градуси}]. \quad (5.3)$$

Зворотна відносна відстань Земля-Сонце  $d_r$  і сонячний нахил  $\delta$  складають:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right), \quad (5.4)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right), \quad (5.5)$$

де  $J$  – кількість днів в році між 1 (1 січня) і 365 або 366 (31 грудня).

Порядковий номер дня року  $J$  розпочинаючи з 1 січня і наведений в додатку Н.

Кут на заході  $\omega_s$  дорівнює

$$\omega_s = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta)]. \quad (5.6)$$

### **Приклад 5.2. Визначення неземної радіації**

Визначити неземну радіацію ( $R_a$ ) на 3 вересня для м. Дніпро (географічні координати 48°27' пн.ш, 34°59' з.д.)

Із рівняння (5.3) 48°27' пн.ш або  $48 + 27/60 = 48,45^\circ$ ,

$$\varphi = \frac{\pi}{180} 48,45 = 0,846 \text{ рад.}$$

3 вересня – (згідно додатку Н) 246 день року ( $J$ )

Із рівняння (5.4)  $d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} 246\right) = 0,985$  рад.

Із рівняння (5.5)  $\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} 246 - 1,39\right) = 0,120$  рад.

Із рівняння (5.6)  $\omega_s = \arccos[-\operatorname{tg}(0,846)\operatorname{tg}(0,120)] = 1,707$  рад.

Із рівняння (5.2)

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} 0,0820 \cdot 0,985 \{1,707 \sin(0,846) + \cos(0,846) \cos[1,20 \cdot \cos(1,707)]\} = 71,53 \text{ Мдж/(м}^2\text{·добу)}.$$

Із рівняння (5.1)  $R_a = 0,408 \cdot 71,53 = 29,18$  мм/добу.

### **Позаземна радіація для годинних і більш коротких періодів ( $R_a$ )**

Для годинних або більш коротких періодів кут сонячного часу на початку і в кінці періоду повинен враховуватися при визначенні  $R_a$ :

$$R_a = \frac{12 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))], \quad (5.7)$$

де  $R_a$  – позаземна радіація протягом години (або більш короткого) періоду, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$G_{sc}$  – сонячна стала = 0,0820 МДж/(м<sup>2</sup>·хв.);

$d_r$  – зворотна відносна відстань Земля-Сонце (рівняння 5.4);

$\delta$  – сонячний нахил, рад (рівняння 5.5);

$\varphi$  – широта, рад (рівняння 5.3);

$\omega_1$  – кут сонячного часу на початку періоду, рад (рівняння 5.8);

$\omega_2$  – кут сонячного часу в кінці періоду, рад (рівняння 5.9).

Кути сонячного часу на початок і кінець періоду дорівнюють, відповідно:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \cdot t_1}{24}, \quad (5.8)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi \cdot t_1}{24}, \quad (5.9)$$

де  $\omega$  – кут сонячного часу в середині годинного (або більш короткого) періоду, рад;

$t_1$  – тривалість розрахункового періоду, год., (тобто 1 для 1 год. і 0,5 для 30 хв).

Кут сонячного часу на середину періоду дорівнює:

$$\omega = \frac{\pi}{12} \{ [t + 0,06667(L_z - L_m) + S_c] - 12 \}, \quad (5.10)$$

де  $t$  – стандартний час в середині періоду, год. Наприклад, для періоду між 14:00 і 15:00  $t = 14,5$ ;

$L_z$  – довгота центру зони місцевого часу, градуси на захід від Гринвіча. Наприклад, 75, 90, 105 і 120° для Східної, Центральної, Рокі Маунтін і Тихоокеанської часових зон (США) і 0° для Гринвіча, 330° для Києва (Україна), і 255° для Бангкока (Тайланд);

$L_m$  – довгота площі вимірювання, градуси на захід від Гринвіча;

$S_c$  – сезонна корекція сонячного часу, год.

Звичайно,  $\omega < -\omega_s$  або  $\omega > \omega_s$  із рівняння (5.10) показує, що Сонце знаходиться за горизонтом і  $R_a$  дорівнює 0.

Сезонна корекція сонячного часу

$$S_c = 0,1645 \sin(2b) - 0,1255 \cos(b) + 0,025 \sin(b), \quad (5.11)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364}, \quad (5.12)$$

де  $J$  – день від початку року.

### Години денного світла ( $N$ )

Години денного світла визначаються як

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s, \quad (5.13)$$

де  $\omega_s$  – кут години заходу Сонця в радіанах із рівняння (5.6). Середнє значення  $N$  (15-й день кожного місяця) для різної довготи дані в (додаток О).

### Приклад 5.3. Визначення годин денного світла

Визначити години денного світла ( $N$ ) на 3 вересня м. Дніпро (48,47° пн. ш.)

Із прикладу 8  $\omega_s = \ar \cos[-tg(0,846)tg(0,120)] = 1,707$  рад.

Із рівняння (5.13)  $N = \frac{24}{\pi} 1,707 = 13,04$  год.

### Сонячна радіація ( $R_s$ )

Якщо сонячну радіацію неможливо виміряти, її можна розрахувати за формулою Ангстрема, яка пов'язує сонячну радіацію з позаземною радіацією і відносною тривалістю сонячного сьйва:

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a, \quad (5.14)$$

де  $R_s$  – сонячна або короткохвильова радіація, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$n$  – фактична тривалість сонячного сяння, год.;

$N$  – максимально можлива тривалість сонячного сьйва або годин денного світла, год.;

$n/N$  – відносна тривалість сонячного сьйва;

$R_a$  – позаземна радіація, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$a_s$  – постійна регресії, яка виражає частину неземної радіації, що досягає Землі в хмарні дні ( $n = 0$ );

$a_s + b_s$  – частина неземної радіації, що досягає Землі в ясні дні ( $n = N$ ).

$R_s$  виражається в МДж/(м<sup>2</sup>·добу). Відповідне еквівалентне випаровування виражається в мм/добу і визначається перемноженням  $R_s$  на 0,408 (рівняння 5.1). Залежно від атмосферних умов (вологості, запиленості) і сонячного нахилу (широти і місяця), значення  $a_s$  і  $b_s$  будуть змінюватись. Там, де дані по фактичній сонячній радіації відсутні і не може бути здійснене калібрування для коефіцієнтів  $a_s$  і  $b_s$ , рекомендується використовувати значення  $a_s = 0,25$  і  $b_s = 0,50$ .

Позаземна радіація  $R_a$  в денні години або максимально можлива тривалість сонячного сьйва  $N$  дані в рівнянні (5.2) і (5.13). Значення



$R_a$  і  $N$  для різних широт також наведені в (додатках О і М). Фактична тривалість сонячного сьйва  $n$  реєструється прибором *Кемпбелла-Стокса*.

**Приклад 5.4. Визначення сонячної радіації за виміряною тривалістю сонячного сьйва**

В м. Дніпро на  $48^{\circ}27'$  пн. ш. години сонячного сьйва зареєстровані в травні склали 220 годин. Визначити сонячну радіацію.

Із рівняння (5.3)  $\varphi = \frac{\pi}{180} 48,45 = 0,846$  рад.

Із додатку табл. П для 15 травня  $J = 135$  день року.

Із рівняння (5.4)  $d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} 135\right) = 0,977$ .

Із рівняння (5.5)  $\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} 135 - 1,39\right) = 0,329$  рад.

Із рівняння (5.6)  $\omega_s = ar \cos[-tg(0,846)tg(0,329)] = 1,965$  рад.

Із рівняння (5.2)

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} 0,0820 \cdot 0,977 \{1,965 \sin(0,846) + \cos(0,846) \cos[0,329 \cdot \cos(1,965)]\} = 90,45$$

Із рівняння (5.13)  $N = \frac{24}{\pi} 1,965 = 15,01$ .

Для травня  $n = \frac{220}{31} = 7,10$  год./добу.

Із рівняння (5.14)  $R_s = \left(0,25 + 0,50 \frac{7,10}{15,01}\right) 90,45 = 44,00$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

В еквівалентному випаровуванні  $R_s = 0,408 \cdot 44,00 = 18,0$  мм/добу.

**Сонячна радіація в ясну погоду ( $R_{so}$ )**

Розрахунок  $R_{so}$  при  $n = N$  необхідний для визначення чистої довгохвильової радіації.

- При висоті, близькому до рівня моря, або коли є калібровані величини  $a_s$  і  $b_s$ :

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a, \tag{5.15}$$

де  $R_{so}$  – сонячна радіація в ясну погоду, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$a_s + b_s$  – частина неземної радіації, що досягає Землю в ясні дні ( $n=N$ ).

- Коли калібровані величини  $a_s$  і  $b_s$  відсутні:

$$R_{so} = \left(0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z\right) R_a, \tag{5.16}$$

де  $z$  – висота над рівнем моря, м.

Для території з невисокою прозорістю повітря, викликаною забрудненнями або повітряним пилом для регіону, де кут сонячних променів значно менше  $50^\circ$ , довжина траєкторії радіації через атмосферу зростає, прийняття закону Бесера може бути використано там, де  $P$  застосовується для представлення атмосферної маси:

$$R_{so} = R_a \exp\left(\frac{-0,0018P}{K_t \sin \phi}\right), \quad (5.17)$$

де  $K_t$  – коефіцієнт запиленості,  $0 < K_t \leq 1$ , де  $K_t = 0$  для чистого повітря і  $K_t = 1$  для сильно непрозорого запиленого або забрудненого повітря,

$P$  – атмосферний тиск, кПа,

$\phi$  – кут сонячних променів над горизонтом, рад,

$R_a$  – позаземна радіація, МДж/(м<sup>2</sup>добу).

Для годинних або більш коротких періодів  $\phi$  розраховується таким чином:

$$\sin \phi = \sin \varphi \sin \delta \div \cos \varphi \cos \delta \cos \omega, \quad (5.18)$$

де  $\varphi$  – географічна широта, рад,

$\delta$  – кут нахилу сонячних променів, рад (рівняння 5.5),

$\omega$  – кут сонячного часу в середині годинного або більш короткого періоду, рад (рівняння 5.10).

За 24-годинні періоди середній добовий кут сонячних променів, розрахований у відповідності до  $R_a$ , може бути апроксимований таким шляхом:

$$\sin \varphi_{24} = \sin \left[ 0,85 \div 0,3 \varphi \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) - 0,42 \varphi^2 \right], \quad (5.19)$$

де  $\varphi_{24}$  – середня  $\varphi$  в денний період, розрахована у відповідності з  $R_a$ , рад;

$\varphi$  – географічна широта, рад;

$J$  – день року.

Змінна  $\varphi_{24}$  використовується в рівнянні (5.17) або (5.21) для того, щоб представити середній кут сонячних променів в денні години і розрахувати для показу впливу інтегрованої 24-годинної трансмісії на 24-годинну  $R_{so}$  атмосферою. Змінна  $\varphi_{24}$  в рівнянні (5.19) повинна бути обмежена до рівня  $\geq 0$ .

У деяких випадках оцінка  $R_{so}$  може бути покращена шляхом модифікації рівняння (5.17) для того, щоб врахувати вплив водяної пари на короткохвильову абсорбцію таким чином:

$$R_{so} = (K_B + K_D)R_a, \quad (5.20)$$

де  $K_B$  – показник чистоти променевої радіації;

$K_D$  – відповідний показник для змішаної променевої радіації;

$R_a$  – позаземна радіація, МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

$$K_B = 0,98 \exp \left[ \frac{-0,00146P}{K_t \sin \varphi} - 0,091 \left( \frac{W}{\sin \varphi} \right)^{0,25} \right], \quad (5.21)$$

де  $K_t$  – коефіцієнт запиленості,  $0 < K_t \leq 1$ , де  $K_t = 1$  для вкрай запиленого або забрудненого повітря;

$P$  – атмосферний тиск, кПа;

$\varphi$  – кут сонячних променів над горизонтом, рад;

$W$  – дощова вода в атмосфері, мм;

$$W = 0,14 e_a P \div 2,1, \quad (5.22)$$

де  $e_a$  – фактичний тиск пари, кПа;

$P$  – атмосферний тиск, кПа.

Показник суміщеної радіації оцінюється виходячи із  $K_B$ :

$$K_D = 0,35 - 0,33 K_B \quad \text{для } K_B \geq 0,15$$

$$K_D = 0,18 - 0,82 K_B \quad \text{для } K_B \leq 0,15 \quad (5.23)$$

Як у випадку з рівнянням (5.17),  $\varphi_{24}$  змінна із рівняння (5.19) використовується для  $\varphi$  в рівнянні (5.21) для 24-годинних розрахунків  $R_{so}$ .

Як правило,  $R_{so}$ , розрахована за допомогою рівнянь (5.16), (5.17) або (5.20), передбачається як огинаюча вимірної  $R_s$  і корисна для тарування інструментів.

### ***Чиста сонячна або чиста короткохвильова радіація ( $R_{ns}$ )***

Чиста короткохвильова радіація, отримана з балансу між прихідною і відбитою сонячною радіацією, дорівнює:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s, \quad (5.24)$$

де  $R_{ns}$  – чиста сонячна або короткохвильова радіація МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$\alpha$  – альbedo або коефіцієнт відбиття крони, що дорівнює 0,23 для гіпотетичної еталонної трав'яної поверхні;

$R_s$  – прихідна сонячна радіація МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$R_{ns}$  виражається в МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

### ***Чиста довгохвильова радіація ( $R_{nl}$ )***

Швидкість емісії довгохвильової енергії пропорційна абсолютній температурі поверхні в четвертому ступені. Ця залежність кількісно виражена законом Стефана-Больцмана. Потік чистої енергії, що кидає

земну поверхню, більше, в порівнянні з висхідним і визначеним законом Стефана-Больцмана через поглинання і радіацію з неба, направленою вниз. Водяні пари, хмари, двоокис азоту і пил є поглиначами і емітерами довгохвильової радіації. Їх концентрації необхідно знати при визначенні висхідного потоку. Оскільки вологість і хмарність відіграють важливу роль, закон Стефана-Больцмана корегується цими двома факторами при визначенні чистого висхідного потоку довгохвильової радіації. Передбачається, що концентрації інших поглиначів постійні:

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\max, K}^4 + T_{\min, K}^4}{2} \right] \left( 0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right), \quad (5.25)$$

де  $R_{nl}$  – чиста висхідна довгохвильова радіація, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана,  $4,903 \cdot 10^{-9}$  МДж/(К<sup>4</sup>·м<sup>2</sup>·сут);

$T_{\max, K}$  – максимальна абсолютна температура протягом 24-годинного періоду  $K = ^\circ\text{C} + 273,16$ ;

$T_{\min, K}$  – мінімальна абсолютна температура протягом 24-годинного періоду  $K = ^\circ\text{C} + 273,16$ ;

$e_a$  – фактичний тиск пари кПа;

$R_s/R_{so}$  – відносна короткохвильова радіація (обмежена значенням  $\leq 1,0$ );

$R_s$  – виміряна або розрахована (рівняння 5.14) сонячна радіація МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$R_{so}$  – розрахункова (рівняння 5.16 або 5.17) радіація для ясного неба МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

Середня максимальна температура повітря в четвертому ступені і мінімальна температура в четвертому ступені зазвичай використовуються в рівнянні Стефана-Больцмана для 24-годинних часових кроків. Рівняння  $(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a})$

виражає поправку до вологості повітря і буде менше при підвищенні вологості. Ефект хмарності виражений в формі  $\left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$ .

Вираз зменшується при збільшенні хмарності і зменшенні  $R_s$ . Чим менше корегуючий вираз, тим менше чистий висхідний потік довгохвильової радіації. Необхідно зауважити, що  $R_s/R_{so}$  в рівнянні (5.25) повинне обмежуватись величиною  $R_s/R_{so} \leq 1,0$ .

Там, де є результати спостережень прихідної і висхідної короткохвильової і довгохвильової радіації протягом яскравих сонячних і

хмарних годин, може бути проведене калібрування коефіцієнтів рівняння (5.25).

Перелік значень  $\sigma T_K^4$  для різних температур повітря наводиться в додатку табл. П.

**Приклад 5.5. Визначення чистої довгохвильової радіації**

В м. Дніпро на 48°27' пн. ш. (=48,45°) 220 годин сонячного саява, середньомісячні максимальна і мінімальна добові температури повітря 25,1 і 19,1 °С відповідно, тиск пари 2,1 кПа були зареєстровані в травні. Визначити чисту довгохвильову радіацію.

Із прикладу 5.4  $R_s = 44,00$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу),  $R_a = 90,45$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

Із рівняння (5.15)  $R_{so} = (0,25 + 0,50)90,45 = 67,83$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

$$\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9} \text{ МДж/(К}^4 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{добу)}.$$

$$T_{\max} = 25,1^\circ \text{C} = 298,3^\circ \text{K}.$$

$$\sigma T_{\max, K}^4 = 4,903 \cdot 10^{-9} \cdot 298,3^4 = 38,8 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{добу)}.$$

$$T_{\min} = 19,1^\circ \text{C} = 292,3^\circ \text{K}.$$

$$\sigma T_{\min, K}^4 = 4,903 \cdot 10^{-9} \cdot 292,3^4 = 35,8 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{добу)}.$$

Проміжні дані для рівняння (5.25)  $e_a = 2,1$  кПа,

$$0,34 - 0,14\sqrt{e_a} = 0,14,$$

$$\frac{R_s}{R_{so}} = \frac{44,00}{67,83} = 0,649, \quad 1,35 \cdot 0,649 - 0,35 = 0,526.$$

Тоді із рівняння маємо (5.25)

$$R_{nl} = \frac{38,8 + 35,8}{2} 0,14 \cdot 0,526 = 2,747 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{добу)},$$

а якщо виразити в еквівалентах випаровування тоді це складе  $2,747 \cdot 0,408 = 1,12$  мм/добу.

**Чиста радіація ( $R_n$ )** – це різниця між прихідною і висхідною чистою короткохвильовою радіацією ( $R_{ns}$ ) і висхідною чистою довгохвильовою радіацією ( $R_{nl}$ ):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}. \tag{5.26}$$

**Приклад 5.6. Визначення чистої радіації**

Визначити чисту радіацію в м. Дніпро в травні за даними із попереднього прикладу.

Із прикладу 5.4 маємо:  $R_s = 44,00$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

Із рівняння (5.24):  $R_{ns} = (1 - 0,23)R_s = 33,88$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

Із прикладу 5.5:  $R_{nl} = 2,747$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

Із формули (5.26):  $R_n = 33,88 - 2,474 = 31,41$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

Виражено в еквівалентному виразі  $R_n = 0,408 \cdot 31,41 = 12,81$  мм/добу.

### *Грунтовий тепловий потік (G)*

Для описування ґрунтового теплового потоку існують комплексні моделі. Так як  $G$  малий в порівнянні з  $R_n$ , особливо якщо поверхня покрита рослинністю і тимчасові кроки розрахунку дорівнюють 24 годинам і більше, існує проста процедура розрахунку для довгих тимчасових кроків, яка виходить із ідеї, що температура ґрунту залежить від температури повітря:

$$G = c_s \frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z, \quad (5.27)$$

де  $G$  – ґрунтовий тепловий потік, МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

$c_s$  – теплова ємкість ґрунту МДж/(м<sup>3</sup>·°С);

$T_i$  – температура повітря в кінці періоду ( $i$ ) °С;

$T_{i-1}$  – температура повітря на початку періоду ( $i-1$ ) °С;

$\Delta t$  – тривалість часового інтервалу, діб;

$\Delta z$  – ефективна глибина ґрунту, м.

Оскільки температура ґрунту затримується за температурою повітря, слід розглядати середню температуру при визначенні добового теплового потоку, тобто  $\Delta t$  повинне перевищувати одну добу. Глибина проникнення теплової хвилі визначається тривалістю часу інтервалу. Ефективна глибина ґрунту  $\Delta z$  дорівнює лише 0,10-0,12 м для інтервалу в один або декілька днів, але може бути і 2 м для періодів, яка вимірюється місяцями. Ґрунтовий тепловий потік залежить від мінерального складу ґрунту і її вологості.

-Для добового і 10-денного періодів: Оскільки амплітуда теплового потоку протягом 1 або 10 днів для еталонної трав'яної поверхні відносно мала, нею можна знехтувати і тоді:

$$G_{day} \approx 0. \quad (5.28)$$

-Для місячних періодів: Приймаючи постійну теплову ємкість ґрунту 2,1 МДж/(м<sup>3</sup>·°С) і відповідну глибину ґрунту, можна використати рівняння (5.27) для визначення  $G$ :

$$G_{month,i} = 0,07(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}), \quad (5.29)$$

або, якщо  $T_{month,i+1}$  невідоме

$$G_{month,i} = 0,14(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}), \quad (5.30)$$

де  $T_{month,i}$  – середньомісячна температура повітря °С;

$T_{month,i-1}$  – середньомісячна температура повітря попереднього місяця °С;

$T_{month,i+1}$  – середньомісячна температура повітря наступного місяця °С.

-Для годинного і більш короткого періодів: Для годинного (і більш короткого) періоду розрахунок  $G$  під щільним трав'яним покривом не корелюється достатньо добре з температурою повітря. Годинний  $G$  може бути розрахований приблизно протягом періодів світлового дня як

$$G_{hr} = 0,1R_n, \quad (5.31)$$

і для нічних періодів як

$$G_{hr} = 0,5R_n. \quad (5.32)$$

Там, де ґрунт нагрівається, ґрунтовий тепловий потік додатний. Кількість енергії, що потрібна для цього процесу, обчислюється із  $R_n$  при визначенні евапотранспірації.

### **Приклад 5.7. Визначення ґрунтового теплового потоку для місячних періодів**

Визначити тепловий потік в квітні в Алжирі при нагріванні ґрунту. Середньомісячні температури березня, квітня і травня 14,1; 16,1 і 18,8 °С відповідно.

Із рівняння (5.29) для квітня  $G = 0,07(18,8 - 14,1) = 0,33$  МДж/(м<sup>2</sup>·добу).

Виразення в еквівалентах випаровування  $G = 0,408 \cdot 0,33 = 0,13$  мм/добу.

## **5.3. Атмосферний тиск (P)**

Атмосферний тиск викликаний масою земної атмосфери. Випаровування на великих висотах збільшується завдяки низькому атмосферному тиску, вираженому психрометричною погіршою. Вплив його, проте, малий і у відсотковому розрахунку достатньо мати середнє значення для місцевості. Спрощення закону ідеального газу, що приймають при +20 °С за стандартну атмосферу, може бути використаний для розрахунку  $P$  або табл. 5.2:

**Таблиця 5.2 – Атмосферний тиск (P) для різної висоти над рівнем моря**

z, м	P, кПа	z, м	P, кПа	z, м	P, кПа	z, м	P, кПа
0	101,3	500	95,5	1000	90,0	1500	84,8
50	100,7	550	95,0	1050	89,5	1550	84,3
100	100,1	600	94,4	1100	89,0	1600	83,8
150	99,5	650	93,8	1150	88,4	1650	83,3
200	99,0	700	93,3	1200	87,9	1700	82,8
250	98,4	750	92,7	1250	87,4	1750	82,3
300	97,8	800	92,2	1300	86,8	1800	81,8
350	97,2	850	91,6	1350	86,3	1850	81,3
400	96,7	900	91,1	1400	85,8	1900	80,8
450	96,1	950	90,6	1450	85,3	1950	80,3
500	95,5	1000	90,0	1500	84,8	2000	79,8

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (5.33)$$

де  $P$  – атмосферний тиск, кПа;  
 $z$  - висота над рівнем моря, м.

#### 5.4. Прихована теплота пароутворення ( $\lambda$ )

Прихована теплота пароутворення застосовується при розрахунку сумарного водоспоживання в методі В.С. Мезенцева ( $L$ ) і формулі Пенмана-Монтейта ( $\lambda$ ). Прихована теплота пароутворення виражає енергію, що потрібна для перетворення одиниці маси води в пар при постійному тиску і температурі. Значення скритої теплоти варіює як функція від температури. При високій температурі потрібно менше енергії, ніж при низькій. Оскільки  $\lambda$  змінюється незначно, при нормальній температурі для рівняння Пенмана-Монтейта прийнята одна величина 2,45 МДж/кг. Це скрита теплота для температури повітря вище 20 °С.

#### 5.5. Психрометрична стала ( $\gamma$ )

Психрометрична постійна визначається за формулою

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0,665 \cdot 10^{-3} P, \quad (5.34)$$

де  $\gamma$  – психрометрична стала, кПа/°С;

$P$  – атмосферний тиск, кПа;

$\lambda$  – скрита теплота пароутворення, 2,45, МДж/кг;

$c_p$  – питома тепло при постійній температурі,  $1,013 \cdot 10^{-3}$ , МДж/(кг·°С);

$\varepsilon$  – відношення молекулярних мас водяного пару і сухого повітря, 0,622.

Питома тепло при постійному тиску – це кількість енергії, потрібної для підвищення температури одиниці маси повітря на один градус при постійному тиску. Його величина залежить від складу повітря, тобто від його вологості. Для середніх атмосферних умов може бути використане значення  $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$  МДж/(кг·°С). Оскільки для кожної місцевості використовується середній атмосферний тиск (рівняння 5.1), психрометрична константа зберігається постійною для кожної місцевості. Психрометрична константа для різних відміток над рівнем моря наведена в табл. 5.3.



**Таблиця 5.3 – Психометрична константа ( $\gamma$ ) для різних відміток над рівнем моря ( $z$ )**

$z$ , м	$\gamma$ , кПа/°С	$z$ , м	$\gamma$ , кПа/°С	$z$ , м	$\gamma$ , кПа/°С	$z$ , м	$\gamma$ , кПа/°С
0	0,067	500	0,064	1000	0,060	1500	0,056
100	0,067	600	0,063	1100	0,059	1600	0,056
200	0,066	700	0,062	1200	0,058	1700	0,055
300	0,065	800	0,061	1300	0,058	1800	0,054
400	0,064	900	0,061	1400	0,057	1900	0,054
500	0,064	1000	0,060	1500	0,056	2000	0,053

### **Приклад 5.8. Визначення атмосферних параметрів**

Визначити атмосферний тиск і психометричну постійну на висоті 200 м. При  $z = 200$  м, за формулою (5.33)

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 \cdot 200}{293} \right)^{5,26} = 99,0 \text{ кПа.}$$

Тоді, за рівняння (5.34) психометрична постійна складе

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot 99,0 = 0,066 \text{ кПа/°С}$$

## **5.6. Температура повітря**

Сонячна радіація, поглинута атмосферою і тепло, що випромінює Земля, підвищує температуру повітря. Фізичне тепло навколишнього повітря передає енергію рослинам і контролює швидкість евапотранспірації. При сонячній теплій погоді втрати води на евапотранспірацію більше, ніж в хмарну і прохолодну погоду.

Необхідна (середня) денна максимальна і мінімальна температура повітря в градусах Цельсія (°С). Якщо є дані вимірювань тільки середньої величини, розрахунки можуть бути проведені, але можливо значення  $E_0$  буде заниженим через нелінійну залежність між тиском пари насичення і температурою (рис. 5.4). Використання середньої температури замість мінімальної і максимальної призводить до заниження тиску насиченого пару  $e_s$ , а, значить і різниці тиску пари ( $e_s - e_a$ ) і меншої величини еталонної евапотранспірації.

Агрометеорологія використовує температуру повітря на висоті крони рослин. На традиційних і сучасних метеорологічних станціях температура повітря вимірюється в тіні (екрани Стівенсона або вентильовані радіаційні щити), встановлених у відповідності зі стандартами на висоті 2 м від поверхні Землі. Затінення призначені для захисту приладів від прямого попадання сонячного тепла. Конструкція

дозволяє повітрю вільно циркулювати навколо приладів. Температура повітря вимірюється термометрами, термографами і термопарами, встановленими в затіненні. Мінімальні і максимальні термометри реєструють мінімальну і максимальну температуру протягом 24 годин. Термографи записують миттєву температуру протягом дня або тижня. Електронні метеостанції часто заміряють температуру повітря кожну хвилину і передають середньогодинні значення в доповнення до максимальних і мінімальних протягом 24 годин.

Через нелінійність даних з вологості, що потрібні для рівняння Пенмана-Монтейта, тиск пари для певного періоду повинен бути розрахований як середній між тиском пари при мінімальній і максимальній температурі повітря за 24-годинний період, розпочинаючи з півночі.  $T_{max}$  і  $T_{min}$  для більш тривалих періодів, таких, як тиждень, декада або місяць, виводяться шляхом ділення суми відповідних денних значень на кількість днів в періоді. Середньодобова температура повітря ( $T_{mean}$ ) використовується у формулі Пенмана-Монтейта лише для розрахунку градієнта кривих тиску насичення пари ( $\Delta$ ) і впливу середньої щільності повітря ( $P_a$ ), так як вплив зміни температури на величину кліматичного параметра в цих випадках дуже малий. Для стандартизації,  $T_{mean}$  для 24-годинного періоду визначається як середнє від добової максимальної ( $T_{max}$ ) і мінімальної ( $T_{min}$ ) температур, більше ніж середнє від годинних вимірювань температури:

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}. \quad (5.35)$$

Температура подається в градусах Цельсія ( $^{\circ}\text{C}$ ) або Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ). В деяких процедурах розрахунку температура потрібна в градусах Кельвіна ( $^{\circ}\text{K}$ ), яку можна отримати додаванням 273,16 до температури Цельсія (практично  $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,16$ ). Шкали Цельсія і Кельвіна мають однакову ціну поділки.

## 5.7. Вологість повітря

Оскільки енергія Сонця і навколишнього повітря є головною рушійною силою випаровування води, різниця між тиском водяного пару на випарній поверхні і в навколишньому повітрі є визначальним фактором переносу пару. Добре зволоженні поля в сухих аридних регіонах споживають велику кількість води дякуючи надлишку енергії і висушуючої сили атмосфери. У вологих тропічних регіонах, незважаючи на велику кількість енергії, висока вологість повітря знижує

потребу у евапотранспірації. В такому середовищі повітря близьке до насиченого парам так, що може бути накопичена менша кількість додаткової води і, відповідно, евапотранспірація нижче, ніж у аридних регіонах.

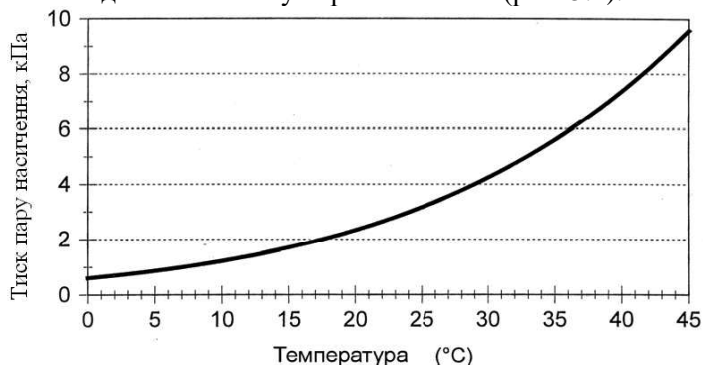
Вміст вологи в повітрі може бути виражене декількома способами. В агрометеорології тиск пари, температура точки роси і відносна вологість є звичайними вираженням для вологості повітря.

### **Тиск пари**

Водяний пар є газом і його тиск є складовою атмосферного тиску. Кількість води в повітрі безпосередньо відноситься до парціального тиску, який викликає водяний пар в повітрі і, отже, є прямою мірою вмісту вологи в повітрі.

В стандартних одиницях СИ тиск більше не виражається в сантиметрах води, міліметрах ртутного стовпа, барах, атмосферах і т. п., а тільки в Паскалях (Па). Перевідні коефіцієнти між різними одиницями і Паскалями наведені в додатку Е. Так як Паскаль співвідношення з відносно малою силою (1 ньютон), прикладений до відносно великої площі (1 м<sup>2</sup>), то зазвичай використовується множення на базову одиницю. Наприклад, тиск пари виражається в кілоПаскалях (кПа = 1000 Па = 10 мб).

Коли повітря затиснуто над випарною поверхнею, досягається рівновага між молекулами води, які залишають і повертаються у водний резервуар. Повітря є насиченим, так як не містить надлишкових молекул води. Відповідний тиск називається тиском пари насичення ( $e^{\circ}(T)$ ). Кількість молекул води, які можуть накопичуватися в повітрі, залежить від температури ( $T$ ). Чим вище температура, тим вище накопичувальна здатність і тиску пари насичення (рис. 5.4).



**Рисунок 5.4 – Тиск насиченого пару як функція температури: крива  $e^{\circ}(T)$**

Як видно із рис. 5.4, крива змінюється експоненціально залежно від температури. При низькій температурі градієнт кривої низький і слабо змінюється з підйомом температури. При високій температурі градієнт великий і невеликі зміни температури виражаються у великих змінах градієнту. Градієнт кривої тиску пари насичення є важливим параметром в описі пароутворення і необхідний в рівняннях для розрахунку  $E_0$  за кліматичними даними.

Фактичний тиск пари ( $e_a$ ) – це тиск пари, який чинить вода в повітрі. Коли повітря не насичене, фактичний тиск пари буде нижче, чим тиск пари насичення. Різниця між тиском насичення і фактичним тиском пари називається дефіцитом тиску пари або дефіцитом насичення і є точним індикатором реальної випаровуючої здатності повітря.

### **Температура точки роси**

Температура точки роси – це температура, до якої повинне бути охолоджене повітря, щоб стати насиченим. Фактичний тиск пари при температурі точки роси дорівнює тиску пари насичення. Чим сухіше повітря, тим більше різниця між температурою повітря і температурою точки роси.

### **Відносна вологість**

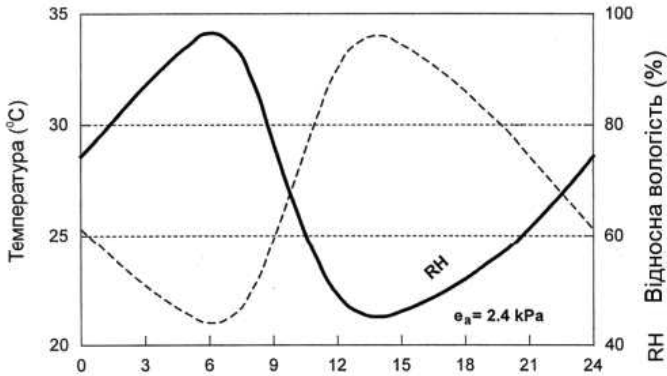
Відносна вологість ( $RH$ ) виражає ступінь насичення повітря як відношення фактичного тиску пари ( $e_a$ ) до тиску пари насичення ( $e^\circ(T)$ ) при тій же температурі ( $T$ ):

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^\circ(T)}. \quad (5.36)$$

Відносна вологість – це відношення кількості води, яку утримує навколишнє повітря, при тій же температурі. Величина безрозмірна і зазвичай виражається у відсотках. Хоча фактичний тиск пари може бути відносно постійним протягом дня, відносна вологість коливається між максимумом на світанку і мінімумом в полудень (рис. 5.5). Зміни відносної вологості є результатом того, що тиск пари насичення визначається температурою повітря. Оскільки температура змінюється протягом дня, відносна вологість також значно змінюється.

### **Вимірювання вологості повітря**

Пряме вимірювання фактичного тиску пари неможливе. Воно зазвичай виражається із відносної вологості або температури точки роси.



**Рисунок 5.5 – Зміна відносної вологості повітря протягом 24 годин при постійно діючому тиску пари 2,4 кПа**

Відносна вологість вимірюється безпосередньо за допомогою гігрометрів. Вимірювання ґрунтується на природі такого матеріалу, як волосина, яка змінює свою довжину залежно від вологості повітря, або на використанні змін електричної ємності залежно від вологості повітря. Тиск пари може бути виміряний непрямо за допомогою психрометрів, які вимірюють різницю температур двох термометрів: з сухим і мокрим резервуаром з ртуттю або спиртом. Термометр з сухим резервуаром вимірює температуру повітря. Термометр з мокрим резервуаром постійно покритий вологою тканиною. Випаровування вологи з тканини потребує енергії і знижує температуру. Чим сухіше повітря, тим більше випарне охолодження і падіння температури. Різниця між температурами, виміряними сухим і вологим резервуаром, називається депресією вологого резервуару і є мірою вологості повітря.

Температура точки роси вимірюється спеціальними приладами. Основним принципом деяких з них є охолодження навколишнього повітря до появи роси. Відповідна температура і буде температурою точки роси.

Дані про відносну вологість і температуру точки роси значно спотворюються похибками вимірювань. Похибка вимірювання є загальною для двох застарілих типів гігротермографів і для більш сучасних електронних інструментів. Особливу увагу необхідно звернути на оцінку точності і інтегральність визначення відносної вологості і температури точки роси. Користувач повинен завжди порівнювати розрахункову температуру точки роси з мінімальною добовою темпера-

турою. Часто краще використовувати температуру точки роси, яка прогнозується із мінімальної добової температури, ніж використовувати ненадійно виміряну відносну вологість. Користувач повинен застосовувати чітку оцінку в цій області.

### **Процедури розрахунку**

#### **Середній тиск пари насичення ( $e_s$ )**

Оскільки тиск пари насичення пов'язаний з температурою повітря, він може бути розрахований з використанням температури повітря. Рівняння апроксимації має вигляд:

$$e^\circ(T) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27T}{T + 237,3} \right]. \quad (5.37)$$

де  $e^\circ(T)$  – тиск пари насичення при температурі  $T$ , кПа;

$T$  – температура повітря, °C;

$\exp [\dots]$  – 2,7183 (основа натурального логарифма в степені [...]).

Значення тиску пари насичення ( $e^\circ(T)$ ) для різних температур наведені в додатку Е.

У зв'язку з нелінійністю рівняння (5.37), середній тиск пари насичення для доби, тижня, декади або місяця повинні розраховуватись як середні між тиском пари насичення і середньодобовою максимальною і мінімальною температурою повітря для даного періоду:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2}. \quad (5.38)$$

Використання середньої температури повітря замість їх максимального і мінімального значення призводить до зниження середнього тиску насиченої пари. Відповідний дефіцит тиску пари (параметр, що виражає випарну силу атмосфери) буде також менше і, як результат, еталонна евапотранспірація культури буде занижена. Отже, середній тиск пари насичення повинен бути розрахований як середнє між тиском пари насичення максимальною і мінімальною добовою температурою.

#### **Приклад 5.9. Визначення середнього тиску пари насичення**

Добова мінімальна і максимальна температура дорівнюють, відповідно, 15,0 і 24,5°C. Визначити тиск пари насичення на цей день.

Із рівняння (5.37) маємо

$$e^\circ(T_{\max}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 \cdot 24,5}{24,5 + 237,3} \right] = 3,075 \text{ кПа},$$

$$e^{\circ}(T_{min}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 \cdot 15}{15 + 237,3} \right] = 1,705 \text{ кПа.}$$

$$\text{За рівнянням (5.38) } e_s = \frac{3,075 + 1,705}{2} = 2,39 \text{ кПа.}$$

При цьому необхідно відмітити, що при середній температурі повітря 19,75 °С, тиск пари насичення складе

$$e^{\circ}(T_{mean}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 \cdot 19,75}{19,75 + 237,3} \right] = 2,30 \text{ кПа.}$$

### **Градiєнт кривої тиску пари насичення ( $\Delta$ ).**

Для розрахунку евапотранспірації потрібно знати градієнт кривої тиску пари насичення відношення між тиском пари насичення і температурою  $\Delta$ . Градієнт кривої (рис. 5.4) при даній температурі дорівнює:

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \cdot \exp \left( \frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2}, \quad (5.39)$$

де  $\Delta$  – градієнт кривої тиску пари насичення при температурі повітря  $T$ , кПа/°С;

$T$  – температура повітря, °С;

$\exp [\dots] - 2,7183$  (основа натурального логарифма в степені [...]).

Градiєнт кривої тиску пари ( $\Delta$ ) для різних температур розрахований за формулою (5.39) наведений в додатку Р.

В рівняння Пенмана-Монтейта, де  $\Delta$  знаходиться і в чисельнику, і в знаменнику, він розраховується з використанням середньої температури повітря (рівняння 4.59).

*Фактичний тиск пари ( $e_a$ ), виведений із температури точки роси*

Оскільки температура точки роси є температурою, до якої необхідно охолодити повітря, щоб воно стало насиченим, фактичний тиск пари ( $e_a$ ) є тиском пари насичення при температурі точки роси ( $T_{dew}$ ), °С або:

$$e_a = e^{\circ}(T_{dew}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 T_{dew}}{T_{dew} + 237,3} \right]. \quad (5.40)$$

*Фактичний тиск пари ( $e_a$ ), виведений із психрометричних даних*

Фактичний тиск пари може бути визначений із різниці між температурою сухого і вологого резервуару термометрів, так званої депресії вологого резервуару. Відношення описується рівнянням:

$$e_a = e^\circ(T_{wet}) - \gamma_{psy}(T_{dry} - T_{wet}), \quad (5.41)$$

де  $e_a$  – фактичний тиск пари, кПа;

$e^\circ(T_{wet})$  – тиск пари насичення при температурі вологого резервуару, кПа;

$\gamma_{psy}$  – психрометрична стала інструменту, кПа/°C;

$T_{dry} - T_{wet}$  – депресія вологого резервуару при температурі  $T_{dry}$  сухого резервуару і  $T_{wet}$  вологого резервуару °C.

Психрометрична стала інструменту буде дорівнювати:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} \cdot P, \quad (5.42)$$

де  $a_{psy}$  – коефіцієнт, що залежить від типу вентиляції вологого резервуару °C<sup>-1</sup>;

$P$  – атмосферний тиск, кПа.

Коефіцієнт  $a_{psy}$ , в основному, залежить від конструкції психрометра і швидкості вентиляції навколо вологого резервуару. Для його визначення використовуються такі величини:

$a_{psy} = 0,000662$  – для вентиляованих (типу Асманн) психрометрів зі швидкістю руху повітря 5 м/с;

0,000800 – для природно-вентилюваних психрометрів (близько 1 м/с);

0,001200 – для невентилюваних психрометрів, встановлених всередині приміщення.

#### **Приклад 5.10. Визначення фактичного тиску пари за замірами психрометра**

Визначити тиск пари за замірами психрометра на ділянці з абсолютною відміткою 200 м. Температура, виміряна термометрами з сухим і вологим резервуарами, дорівнює, відповідно, 25,6 і 19,5 °C.

Із рівняння (5.33) при  $z = 200$  м,  $P = 99,0$  кПа (див. приклад 5.8).

Із рівняння (5.37) при  $T_{wet} = 19,5$  °C

$$e^\circ(T_{wet}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 \cdot 19,5}{19,5 + 237,3} \right] = 2,267 \text{ кПа.}$$

Із рівняння (5.41) для вентиляованого психрометра ( $a_{psy} = 0,000662$  °C<sup>-1</sup>), фактичний тиск пари складає  $e_a = 2,267 - 0,000662 \cdot 99,0(25,6 - 19,5) = 1,87$  кПа.

*Фактичний тиск пари ( $e_a$ ), виведений з даних відносної вологості*

Фактичний тиск пари може бути також розрахований по відносній вологості. Залежно від наявності даних про вологість, можуть бути використані різні рівняння:

- для  $RH_{max}$  і  $RH_{min}$ :



$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^\circ(T_{\min}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2}, \quad (5.43)$$

де  $e_a$  – фактичний тиск пари, кПа;

$e^\circ(T_{\min})$  – тиск пари насичення при мінімальній добовій температурі, кПа;

$e^\circ(T_{\max})$  – тиск пари насичення при максимальній добовій температурі кПа;

$RH_{\max}$  – максимальна відносна вологість, %;

$RH_{\min}$  – мінімальна відносна вологість, %.

Для періодів в тиждень, декаду або місяць  $RH_{\max}$  і  $RH_{\min}$  отримані шляхом ділення добових значень на кількість днів періоду.

- для  $RH_{\max}$ :

При використанні приладів з великою похибкою вимірювання  $RH_{\min}$  або коли обробка даних по  $RH$  є сумнівною, необхідно використовувати лише  $RH_{\max}$ :

$$e_a = e^\circ(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100}. \quad (5.44)$$

- для  $RH_{\text{mean}}$ :

При відсутності  $RH_{\max}$  і  $RH_{\min}$  для визначення  $e_a$  може бути використане інше рівняння:

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \left[ \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2} \right], \quad (5.45)$$

де  $RH_{\text{mean}}$  – є середня відносна вологість, визначена як середнє між  $RH_{\max}$  і  $RH_{\min}$ .

Однак, рівняння (5.45) менш доцільне, ніж рівняння (5.43) або (5.44).

#### **Приклад 5.11. Визначення фактичного тиску пари за відносною вологістю**

Маючи наступні добові мінімальні і максимальні температури і відповідну відносну вологість,  $T = 18^\circ\text{C}$  і  $RH_{\max} = 82\%$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$  і  $RH_{\min} = 54\%$ , необхідно визначити фактичний тиск пари.

З рівняння (5.37) при  $T_{\min} = 18^\circ\text{C}$

$$e^\circ(T_{\min}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 \cdot 18}{18 + 237,3} \right] = 2,064 \text{ кПа},$$

$$\text{при } T_{\max} = 25^\circ\text{C} \quad e^\circ(T_{\max}) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27 \cdot 25}{25 + 237,3} \right] = 3,168 \text{ кПа}.$$

$$\text{З рівняння (5.43) } e_a = \frac{2,064 \frac{82}{100} + 3,168 \frac{54}{100}}{2} = 1,70 \text{ кПа.}$$

При застосуванні середньої відносної вологості повітря  $H_{\text{mean}} = 68 \%$ , за формулою (5.45) визначаємо фактичний тиск пари

$$e_a = \frac{68}{100} \left[ \frac{2,064 + 3,168}{2} \right] = 1,78 \text{ кПа.}$$

Для подальших розрахунків краще застосовувати значення, отримане за формулою (5.43), так як воно вважається точнішим.

### **Дефіцит тиску пари** ( $e_a - e_s$ )

Дефіцит тиску пари – це різниця між тиском пари насичення ( $e_s$ ) і фактичним тиском пари ( $e_a$ ) для даного періоду часу. Для таких періодів, як тиждень, декада, місяць,  $e_s$  розраховують за рівнянням (5.38) з використанням  $T_{\text{max}}$  і  $T_{\text{min}}$ , осереднених за період часу і, подібно цьому,  $e_a$  розраховується за допомогою рівнянь (5.43)–(5.45), використовуючи середні дані вимірювань за період. Як вказувалось вище, використання в рівнянні (5.38) середньої температури повітря, а не  $T_{\text{max}}$  і  $T_{\text{min}}$ , виражається в заниженому значенні  $e_s$ , отже, в більш низькому дефіциті тиску пари і  $E_0$ .  $e_s$  і  $e_a$  можуть бути також розраховані для тривалих періодів часу, як середні величини від їх значень, розрахованих для кожного дня цього періоду.

#### **Приклад 5.12. Визначення дефіциту тиску пари**

Визначити тиск пари за даними попереднього прикладу.

З попереднього прикладу  $e^\circ(T_{\text{min}}) = 2,064$  кПа,  $e^\circ(T_{\text{max}}) = 3,168$  кПа,  $e_a = 1,70$  кПа.

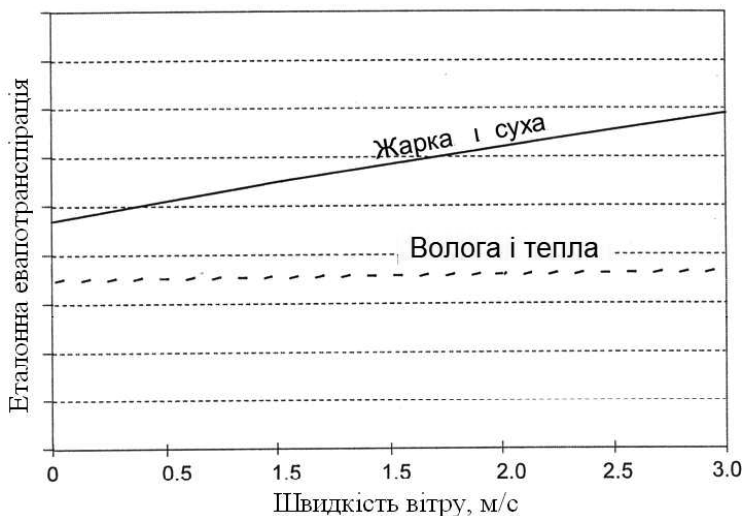
$$\text{Тоді } e_s - e_a = \frac{2,064 + 3,168}{2} - 1,70 = 0,91 \text{ кПа.}$$

## **5.8. Швидкість вітру**

Процес випаровування в більшій мірі залежить від турбулентності вітру і повітря, яка переносить великі маси повітря над випарною поверхнею. Випаровуючи воду, повітря над випарною поверхнею поступово насичується водяними парами. Якщо це повітря не заміщається постійно більш сухим, рушійна сила видалення водяної пари і евапотранспірації послаблюється.

Сукупний ефект кліматичних факторів, який впливає на евапотранспірацію, наведений на рис. 5.6 для двох різних кліматичних умов. Евапотранспірація висока при жаркій і сухій погоді завдяки сухості повітря і енергії прямої сонячної радіації, а також прихованого тепла.

За цих обставин в повітрі акумулюється значна кількість водяних парів, доки вітер дозволить парам видалитись з поверхні. З другого боку, в умовах вологої погоди висока вологість повітря при наявності хмарності знижує евапотранспірацію. Чим сухіше повітря, тим більше вплив на  $E$  і тим більше градієнт кривої. Для вологості умовний вітер може замінити насичене парами повітря менш насиченим і зняти теплову енергію. Отже, швидкість вітру впливає на евапотранспірацію в меншій мірі, чим в аридних умовах, де невеликі зміни швидкості вітру можуть виражатись в порівняно великих змінах швидкості евапотранспірації.



**Рисунок 5.6 – Ілюстрація впливу швидкості вітру на евапотранспірацію в умовах жарко-сухої і тепло-вологої погоди**

Потрібна середньодобова швидкість вітру в метрах в секунду (м/с), виміряна на висоті 2 м від поверхні землі. Важливо перевірити висоту вимірювання швидкості вітру, так як швидкість вітру, виміряна на різній висоті, значно різнитися.

### **Вимірювання швидкості вітру**

Вітер характеризується напрямком і швидкістю. Якщо напрямок вітру для евапотранспірації особливого значення не має, то швидкість вітру є дуже важливою змінною. Якщо швидкість вітру на місцевості змінюється в часі, її необхідно виразити як середнє за розглянутий період. Швидкість вітру виражається в метрах на секунду (м/с) або кілометрах за добу (км/добу).

Швидкість вітру вимірюють анемометрами або флюгерами. Анемометри зазвичай встановлюються на метеостанціях і складаються із пропелерів, які обертаються завдяки сили вітру. Середня швидкість вітру за період розраховується визначенням кількості обертів за певний час.

**Залежність вітрового профіля**

Швидкості вітру, виміряні на різній висоті, відрізняються одна від одної. Тертя по поверхні знижує швидкість вітру над нею. Тому анемометри встановлюються на стандартній висоті: 10 м для метеостанцій і 2 або 3 м для агрометеостанцій. Флюгери встановлюють на висоті 10–12 і більше метрів на поверхню землі. Швидкість вітру визначають за ступенем відхилення дошки флюгера від вертикального положення. Для розрахунку евапотранспірації потрібні дані вимірювань швидкості вітру на висоті 2 м над поверхню Землі. Щоб скорегувати дані зі швидкості вітру, виміряної на іншій висоті, можна використовувати логарифмічний вітровий профіль для вимірювань над поверхнею з коротким трав'яним покривом:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)}, \tag{5.46}$$

де  $u_2$  – швидкість вітру на висоті 2 м над поверхню землі, м/с;

$u_z$  – швидкість вітру, виміряна на висоті  $z$  м над поверхню землі, м/с;

$z$  - висота вимірювань м.

Відповідні перевідні коефіцієнти наведені в табл. 5.4 і показані на рис. 5.7.

**Приклад 5.13. Приведення швидкості вітру до стандартної висоти**

Визначити швидкість вітру на висоті 2 м, якщо швидкість 3,2 м/с виміряна на висоті 10 м над поверхню Землі.

$u_z = 3,2$  м/с,

$z = 10$  м.

З формули (5.46)  $u_2 = 3,2 \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot 10 - 5,42)} = 2,39$  м/с.

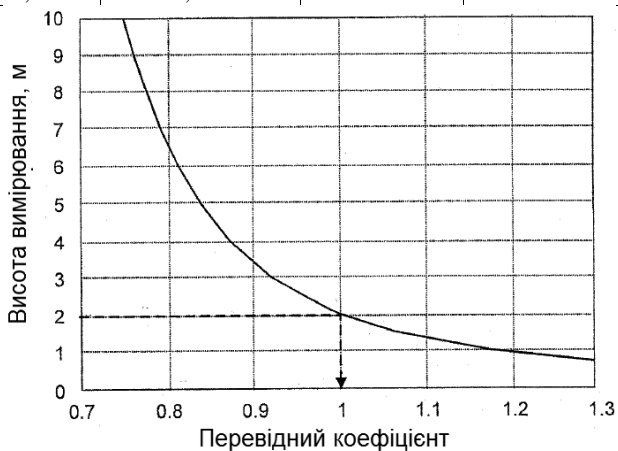
**5.9. Відсутність кліматичних даних**

Можуть бути ситуації, коли деякі метеодані відсутні. В загальному випадку необхідно не допускати процедури розрахунку  $E_0$ , що потребують обмеженої кількості метеорологічних параметрів. Рекомендується розраховувати  $E_0$  з використанням стандартного метода Пен-

мана-Монтейта після вирішення специфічних проблем недостатності даних.

**Таблиця 5.4 – Фактори переведення швидкості вітру, виміряної на даній висоті (над травою) до швидкостей вітру, що виміряні на стандартній висоті 2 м над поверхнею землі**

z висота, м	Фактор перетворення	z висота, м	Фактор перетворення
1,0	1,178	4,6	0,851
1,2	1,125	4,8	0,844
1,4	1,084	5,0	0,838
1,6	1,051	5,2	0,833
1,8	1,023	5,4	0,827
2,0	1,000	5,6	0,822
2,2	0,980	5,8	0,817
2,4	0,963	6,0	0,812
2,6	0,947	6,5	0,802
2,8	0,933	7,0	0,792
3,0	0,921	7,5	0,783
3,2	0,910	8,0	0,775
3,4	0,899	8,5	0,767
3,6	0,889	9,0	0,760
3,8	0,881	9,5	0,754
4,0	0,872	10,0	0,748
4,2	0,865	10,5	0,742
4,4	0,857		



**Рисунок 5.7 – Коефіцієнт переведення швидкості вітру, виміряної на певній висоті, до швидкості вітру на стандартній висоті (2 м) над поверхнею Землі**

Використання повного чи неповної вибірки даних для розрахунку  $E_0$  дає меншу відмінність в її значенні у порівнянні з іншими методами розрахунку.

Навіть якщо набір даних містить мінімальні і максимальні значення температури повітря, можливе отримання придатних значень  $E_0$  для декади або місяця за допомогою метода Пенмана-Монтейта. Дані про радіацію можуть бути визначені з різниці температур або, разом з даними про швидкість вітру і вологість, можуть бути взяті з найближчої метеостанції. Дані про вологість можуть бути також визначені із мінімальної добової температури. Після оцінки можливості використання даних за сусідньою метеостанцією, можуть бути розраховані декадні або місячні значення  $E_0$ .

Процедури з визначення недостатніх даних повинні бути оцінені на регіональному рівні. Це може бути виконано для метеостанцій з повним набором даних, порівнюючи з  $E_0$ , розрахованої за повним і неповним набором даних. Співвідношення повинне бути близьким до одиниці. Якщо співвідношення дуже відрізняється від одиниці, воно може бути використане як корегуючий фактор для визначення, виконаного на основі неповного набору даних. Там, де стандартна похибка визначення перевищує 20 % від значення  $E_0$ , необхідний аналіз чутливості для визначення причин (і меж) використання методу з тією умовою, щоб доповнити недостатній ряд даних. Оцінка повинна бути виконана для кожного місяця і кожної перемінної, як для добових, так і для місячних визначень.

### **Визначення відсутніх даних вологості повітря**

Там, де дані вологості повітря відсутні або їх якість сумнівна, фактичний тиск пари  $e_a$  може бути отриманий за допомогою допущення, що температура точки роси ( $T_{dew}$ ) близька до добової мінімальної температури ( $T_{min}$ ). Це припущення передбачає, що на світанку, коли температура повітря близька до мінімальної  $T_{min}$ , повітря майже насичене водяним паром, а відносна вологість близька до 100 %. Якщо  $T_{min}$  використовується як  $T_{dew}$ , то:

$$e_a = e^{\circ}(T_{min}) = 0,611 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3}\right). \quad (5.47)$$

Відношення  $T_{min} \approx T_{dew}$  типове для площ, де рослинність навколо метеостанцій добре зволожена. Проте, особливо в аридних регіонах, повітря може і не бути насиченим при мінімальній температурі. От-

же,  $T_{min}$  може бути більше  $T_{dew}$  і може знадобитись подальше калібрування для визначення температури точки роси. В цих умовах  $T_{min}$  вищенаведеному рівнянню може бути краще апроксимоване шляхом віднімання 2–3 °C із  $T_{min}$ . В гумідному і напівгумідному кліматі  $T_{min}$  і  $T_{dew}$ , виміряні рано-вранці, можуть бути менше, ніж  $T_{dew}$ , виміряна протягом денного часу, через конденсацію роси в нічний час. Після світанку випаровування роси знову зволожить повітря і підвищить значення  $T_{dew}$ , виміряної в денний час. Цей феномен ілюструється на рис. 5.5. Проте, це стандартна практика 24-годинних розрахунків  $E_0$  з використанням  $T_{dew}$ , виміряної або розрахованої рано-вранці.

Необхідно перевірити визначення  $e_a$  із  $T_{min}$ . Коли прогноз через рівняння (5.47) оцінюється для регіону, він може бути використаний для визначення добового значення  $e_a$ .

### **Визначення відсутніх даних радіації**

Прилади для вимірювання чистої радіації, які потребують професійного контролю, рідко встановлюються на агрометеорологічних станціях. При відсутності прямих вимірювань, довгохвильова і чиста радіація можуть бути знайдені із більш загальних метеорологічних параметрів, тобто сонячної радіації або годин сонячного сйва, температури повітря і тиску пари. Якщо сонячна радіація не вимірюється, вона може бути визначена із тривалості годин яскравого сонячного сйва ( $n$ ). Проте, там, де немає даних стосовно годин сонячного сйва, сонячна радіація не може бути розрахована за допомогою раніше запропонованої процедури. В даному розділі наводяться різні методи визначення сонячної радіації за альтернативною методикою.

### **Дані за сонячною радіацією з найближчих метеостанцій**

Цей метод ґрунтується на факті, що змінні, що впливають на сонячну радіацію  $R_s$ , яка на надходить, і тривалість сонячного сйва  $n$  для одного і того ж місяця і навіть для одного і того ж дня, є ідентичними для всього регіону. Це означає, що:

- 1) розмір регіону невеликий;
- 2) повітряні маси, що впливають на дощ і хмарність, майже ідентичні для різних частин регіону;
- 3) фізико-географічні параметри регіону одноманітні.

Різниця в рельєфі повинна бути незначною, так як вона сильно впливає на рух повітряних мас. В цих умовах можуть бути використані дані про радіацію, спостережені на найближчих метеостанціях.

Необхідно проявляти обережність при використанні цього методу для гірських і прибережних районів, де різниця в експозиції і абсолютній відмітці може бути важлива, або де дощі є перемінною, залежно від умов конвекції. Більше того, не можуть бути використані дані з найближчої метеостанції, розташованої по інший бік гір, так як умови, що впливають на радіацію, відрізняються. Користувач повинен розглядати кліматичні умови на обох місцевостях і отримати інформацію від місцевого персоналу про різницю за типом і щільністю хмарності.

Там, де відстань з півночі на південь в межах однорідного регіону перевищує 50 км і значення  $R_a$  змінюється, вимірювання  $R_s$  повинне бути адаптоване з використанням відношення сонячної радіації до наземної  $R_s/R_a$ :

$$R_s = \frac{R_{s,reg}}{R_{a,reg}} R_a, \quad (5.48)$$

де  $R_{s,reg}$  – сонячна радіація на рівні регіону МДж/(м<sup>2</sup> добу);

$R_{a,reg}$  – позаземна радіація на рівні регіону МДж/(м<sup>2</sup> добу).

Після визначення сонячної радіації за даними радіації з найближчої метеостанції, можна розрахувати чисту довгохвильову радіацію (рівняння 5.25) і чисту радіацію (рівняння 5.26).

Рівняння (5.48) рекомендоване для розрахунку місячних значень  $E_0$ . При використанні методу добового визначення  $E_0$  необхідний ретельний аналіз метеоданих, щоб перевірити, чи розташовані обидві метеостанції в однорідному кліматичному регіоні і чи достатньо близькі, щоб їх умови були однакові в один і той же день. Аналіз повинен включати порівняння добових, особливостей максимальної і мінімальної температури та вологості повітря. Фактично, подібна хмарність і тривалість сонячного сьйва показують подібність температури і вологості повітря.

Зазвичай добові розрахунки  $E_0$  з відповідною радіацією є задовільними, якщо вона визначається як сума або середнє за період в декілька діб. Це випадок розрахунку середньої евапотранспірації між послідовними поливами або при плануванні графіку поливів. В цих умовах відносна похибка для одного дня часто компенсується похибкою для іншого дня за період осереднення. Денні визначення не повинні бути використані як дійсні добові визначення, але тільки як середні значення, визначені за період, що розглядається.



### **Сонячна радіація, виведена із різниці температур повітря**

Різниця між максимальною і мінімальною температурою залежить від ступеня хмарності. При ясній погоді вдень бувають високі температури ( $T_{max}$ ), так як атмосфера прозора для сонячної радіації, що надходить, а вночі – низькі ( $T_{min}$ ), так як атмосферою поглинається менше випроміненої довгохвильової радіації. З іншого боку, в умовах хмарності  $T_{max}$  відносно менші, так як значна частина сонячної радіації, що надійшла, ніколи не досягає земної поверхні, а поглинається або відбивається хмарами. Відповідно,  $T_{min}$  буде порівняно вище, так як хмарність діє неначе ковдра і знижує чисту випромінену довгохвильову радіацію. Отже, різниця між максимальною і мінімальною температурою повітря ( $T_{max}-T_{min}$ ) може бути використана, як індикатор частини неземної радіації, що сягає земної поверхні. Цей принцип використаний Харгрейвом і Самані для визначення  $E_0$  з використанням лише температурних даних.

Формула радіації Харгрейва перевірена і оцінена на декількох метеостанціях, в різних кліматичних умовах, має вигляд:

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a, \quad (5.49)$$

де  $R_a$  – позаземна радіація МДж/(м<sup>2</sup> добу);

$T_{max}$  – максимальна температура повітря °С;

$T_{min}$  – мінімальна температура повітря °С;

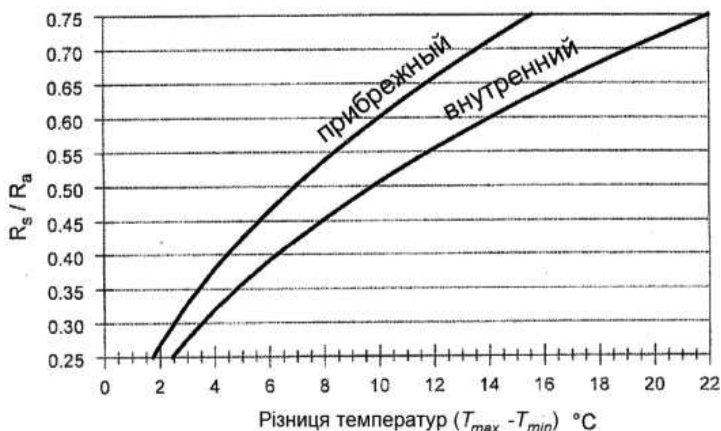
$k_{R_s}$  – коригуючий коефіцієнт (0,16-0,19) °С<sup>-0,5</sup>.

Квадратний корінь із різниці температур тісно пов'язаний з існуючою денною сонячною радіацією в даній місцевості. Коригуючий коефіцієнт  $k_{R_s}$  є емпіричним і відрізняється для «внутрішніх» і «прибережних» регіонів.

- для «внутрішніх» місцевостей, де домінує земна поверхня і повітряні маси не підлягають сильному впливу з боку великого водного об'єкту,  $k_{R_s} \cong 0,16$ ;

- для «прибережних» місцевостей, розташованих поблизу великого водного об'єкту,  $k_{R_s} \cong 0,19$ .

Відношення між  $R_s/R_a$  і різницею температур показано на рис. 5.8 для внутрішніх і прибережних територій. Частина неземної радіації, яка досягає поверхні Землі,  $R_s/R_a$ , змінюється від 0,25 вдень при великій хмарності до 0,75 в ясний день.  $R_s$ , прогнозована рівнянням (5.49), повинна бути обмежена до  $s_o \leq R$  із рівняння (5.15) або (5.16).



**Рисунок 5.8 – Взаємозалежність між частиною неземної радіації, що досягає поверхні Землі  $R_s/R_a$  і різницею температури повітря  $T_{max} - T_{min}$  для внутрішніх ( $k_{RS} = 0,16$ ) і прибережних ( $k_{RS} = 0,19$ ) регіонів**

Метод різниць температур рекомендується для територій, де неможливо взяти дані про радіацію з регіональної метеостанції, або через відсутність однотипних кліматичних умов, або дані за регіоном відсутні. Для умов острова, методика рівняння (5.49) неправомірна через пом'якшувальний ефект найближчого водного об'єкта.

При обчисленні добових значень  $E_0$  необхідна обережність. Порада, дана для рівняння (5.48), досить придатна і тут. Рекомендовано, щоб добові визначення  $E_0$ , що ґрунтуються на визначенні  $R_s$ , підсумовувались або осереднювались за період в декілька днів, наприклад, за тиждень, декаду або місяць для того, щоб зменшити похибку прогнозу.

**Приклад 5.14 Визначення сонячної радіації із температурних даних**

Визначити сонячну радіацію за липень в Синельнокові (Дніпропетровська обл.) на широті  $45^{\circ}43'$  пн. ш. і відмітці 200 м. В липні середньомісячна максимальна і мінімальна температура дорівнює  $26,6$  і  $14,8$  °C, відповідно.

Широта  $\varphi = 45^{\circ}43' = +45,72$  десятичних градусів  $0,80$  рад.

День року – 15 липня – 196 день.

З рівняння (5.2) або додатку M Ra =  $40,6$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

З рівняння (5.49)  $R_s = 0,16 \cdot \sqrt{(26,6 - 14,8)} \cdot 40,6 = 22,3$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

З рівняння (5.1) еквівалентне випаровування  $R_s = 22,3 \cdot 0,408 = 9,1$  мм/добу.

**Приклад 5.15. Визначення чистої радіації за відсутності даних про неї**

Розрахувати чисту радіацію для Бангкока (Філіппіни) ( $13^{\circ}44'$  пн. ш.) з використанням  $T_{max}$  і  $T_{min}$ . Станція розташована на березі на висоті в 2 м над рівнем

моря. В квітні середньомісячне значення максимальної добової температури, добової мінімальної температури і добового тиску пари дорівнює, відповідно, 34,8 °С, 25,5 °С, 2,85 кПа.

Для широти 13°44' пн. ш. = +13,73 десятичних градусів = 0,24 радіан.

Для 15 квітня  $J = 105$ .

З рівняння (5.2) або додатку  $M R_a = 38,1$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

$k_{R_s} = 0,19$ .

$(T_{max} - T_{min}) = (34,8 - 25,6) = 9,2$  °С.

З рівняння (5.49)  $R_s = 0,19 \sqrt{9,2} \cdot 38,1 = 21,9$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

З рівняння (5.15)  $R_{s0} = 0,75 R_a = 28,5$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

З рівняння (5.24)  $R_{ns} = 0,77 R_s = 16,9$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

$\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9}$  МДж/(К<sup>4</sup> м<sup>2</sup> добу).

$T_{max} = 34,8$  °С,

$\sigma T_{max, K^4} = 44,1$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

$T_{min} = 25,6$  °С,

$\sigma T_{min, K^4} = 39,1$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

$\frac{\sigma T_{max, K^4} + \sigma T_{min, K^4}}{2} = 41,6$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

$e_a = 2,85$  кПа.

$(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) = 0,1$ .

$R_s / R_{s0} = 0,77$ ,

$(1,35 R_s / R_{s0} - 0,35) = 0,69$ ,

З рівняння (5.25)  $R_{nl} = 41,6 \cdot 0,10 \cdot 0,69 = 2,9$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

З рівняння (5.26)  $R_n = 16,9 - 2,9 = 14,0$  МДж/(м<sup>2</sup> добу).

З рівняння (5.1) еквівалентне випаровування  $R_n = 14,0 \cdot 0,408 = 5,7$  мм/добу.

## **Відсутні дані про швидкість вітру**

### **Дані про швидкість вітру з найближчої метеостанції**

Прийняті дані про швидкість вітру за найближчою метеостанцією, аналогічні як і для даних про радіацію, ґрунтуються за фактом, що потік повітря над «однорідним» регіоном може відносно сильно змінюватись протягом дня, але ці зміни невеликі у відношенні до тривалих періодів або до сумарних значень за добу. Дані з сусідньої метеостанції можуть бути використані в тому випадку, коли повітряні маси мають однакове походження і корегуються одним фронтом і коли рельєф є ідентичним.

При використанні даних за швидкістю вітру за найближчою метеостанцією, вони повинні бути співставлені з регіональним кліматом, тенденцією в зміні інших метеорологічних параметрів і рельєфу. Сильні вітри часто асоціюються з низькою відносною вологістю, а легкі – з високою. Таким чином, тенденції в зміні максимальної і мінімальної добової відносної вологості повинні бути однакові в обох місцевостях. В гірських районах дані не обов'язково приймати за найближчою метеостанцією, але можна взяти їх із сусідніх станцій з однаковою абсолютною відміткою і вони підлягатимуть впливу привалюючих вітрів. Парні станції можуть змінюватись посезонно залежно від привалюючих вітрів.

Запозичені дані можуть бути використані для місячних визначень евапотранспірації. Добові розрахунки використовуються як сума або середні за такий період, як тиждень або декада.

### ***Емпіричне визначення місячної швидкості вітру***

Оскільки зміни середньої швидкості вітру протягом місяця порівняно малі і коливаються навколо деяких середніх значень, можуть також бути визначені місячні значення швидкості вітру. «Середні» визначення може бути вибрано із інформації про регіональний клімат, але необхідно приймати до уваги сезонні зміни. Загальні значення наведені в табл. 5.5.

***Таблиця 5.5 – Загальні класи місячної швидкості вітру***

Опис	Середньомісячна швидкість на висоті 2 м, м/с
Легкий вітер	До 1,0
Легкий до помірного	1-3
Помірний до сильного	3-5
Сильний	Більше 5

Якщо в регіоні немає даних про швидкість вітру, як тимчасову величину, тоді може бути прийнята 2 м/с. Це значення є середнім для 2000 метеорологічних станцій на всій земній кулі.

Вцілому, швидкість вітру на висоті 2 м повинна бути обмежена  $u_2 \geq 0,5$  м/с при її використанні в рівнянні  $E_0$  (4.59). Необхідно враховувати нестабільність пограничного шару і обмін паром на поверхні за безвітряної погоди. Цей ефект виникає у випадках малої швидкості вітру і повітряному обміні поблизу поверхні Землі. Обмеження  $u_2 \geq 0,5$  м/с в рівняннях  $E_0$  підвищує точність розрахунків в умовах дуже низької швидкості вітру.

### **Мінімальні вимоги до даних**

Цей параграф показує, як сонячна радіація, тиск пари і вітер можуть бути визначені при їх відсутності. Багато із запропонованих процедур ґрунтуються на вимірюванні максимальної і мінімальної температури. Нажаль, не існує методів визначення температури, якщо її вимірювання пропущені. Отже, передбачається, що наявність добової максимальної і мінімальної температури є мінімальною вимогою, необхідною для застосування методу Пенмана-Монтейта.

#### **Альтернативне рівняння для $E_0$ , за відсутності метеоданих**

Якщо дані про сонячну радіацію, відносну вологість і/або швидкість вітру відсутні, вони визначаються у відповідності до процедури, викладеної в цьому розділі. Як альтернатива,  $E_0$  може бути визначена з використанням рівняння Харгрейва

$$E_0 = 0,023 \cdot (T_{\text{mean}} + 17,8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} R_a, \quad (5.50)$$

де всі параметри попередньо визначені.

Одиницями вимірювання для  $E_0$  і  $R_a$  в рівнянні (5.50) є мм/добу. Рівняння (5.50) повинно бути перевірене в кожному новому регіоні шляхом порівняння з даними, отриманими за рівнянням Пенмана-Монтейта (рівняння 4.59) на метеостанціях, де сонячна радіація, температура повітря, вологість і швидкість вітру відомі. Якщо необхідно, рівняння (5.50) може бути каліброване за місячною або річною основою з визначенням емпіричних коефіцієнтів за рівнянням

$$E_0 = a + b \cdot ET_{0Eq.50}, \quad (5.51)$$

де  $Eq.50$  відноситься до визначення  $E_0$  за допомогою рівняння (5.50).

Коефіцієнти  $a$  і  $b$  можуть бути визначені регресивним аналізом або візуальною підгонкою. Вцілому, визначення сонячної радіації, тиску пари і швидкості вітру, як це описано в рівняннях (5.47) – (5.49) і табл. 5.5, а потім використано ці визначення в рівнянні (4.66) (рівнянні Пенмана-Монтейта), забезпечують більш точне визначення в порівнянні з визначенням  $E_0$  безпосередньо, використовуючи рівняння (5.50). Це необхідно віднести до здатності рівнянь включати загальні кліматичні характеристики, такі, як висока або низька швидкість вітру або висока чи низька порівняльна вологість у визначенні  $E_0$  через рівняння (4.66).

Рівняння (5.50) має тенденцію до заниження при високій швидкості вітру ( $u_2 > 3$  м/с) або до завищення при високій відносній вологості.

### **Питання для самоконтролю**

1. Яким чином місцезнаходження зрошуваної ділянки впливає на сумарне випаровування?
2. Які види сонячної радіації застосовують при розрахунку евапотранспірації? Який існує їх взаємозв'язок?
3. Яким чином можна перерахувати радіацію, що йде на випаровування у еквівалент шару вологи?
4. Що називають прихованою теплотою пароутворення?
5. Як температура повітря впливає на процес евапотранспірації?
6. Які показники вологості повітря застосовують при розрахунку евапотранспірації? Який взаємозв'язок існує між ними?
7. Як можна визначити дефіцит вологості повітря за температурою і відотною вологістю?
8. Як швидкість вітру впливає на процес сумарного випаровування?
9. Як залежить швидкість вітру від висоти установки флюгеру, або анемометра? Як можна привести швидкість вітру до стандартної висоти установки приладу 2 м?
10. Які є способи визначення відсутніх даних вологості повітря?
11. Яким чином можна відновити відсутні дані радіації?
12. Як можна встановити дані швидкості вітру при відсутності відомостей про них?
13. Які мінімальні вимоги до метеорологічних даних при розрахунку сумарного водоспоживання сільськогосподарським полем?
14. Яке є альтернативне рівняння для визначення випаровуваності, коли відсутні метеодані?

## **6. ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ ВОДНОГО БАЛАНСУ, ЩО ФОРМУЮТЬ РЕЖИМ ЗРОШЕННЯ**

Більшість розрахункових методів визначення режимів зрошення сільськогосподарських культур базується на використанні рівняння водного балансу. В розділі 4 розглянуто методи розрахунку основного і найбільш складного елементу – сумарного водоспоживання. Крім того, на режим зрошення впливають і інші показники: атмосферні опади та їх втрати на поверхневий і глибинний скид, підживлення ґрунтовими водами. Ці елементи водного балансу присутні як при природному зволоженні, так і при зрошенні. При зрошенні земель вони можуть проявлятися в значній мірі.

### **6.1. Врахування атмосферних опадів**

Атмосферні опади є основним фактором поповнення ґрунтової вологи при природному зволоженні, а також при зрошенні. У всіх випадках атмосферні опади потрібно вимірювати безпосередньо після їх випадіння. На сьогодні неможна точно визначити величину атмосферних опадів непрямыми методами.

Для вимірювання атмосферних опадів застосовують різні опадоміри і дощоміри. З 1952 р. всі дощоміри були замінені на всій мережі метеорологічних станцій на опадоміри В.Д. Третьякова.

Характерні риси методики вимірювання опадів:

- 1) всюди опадоміри встановлені на висоті 2 м над землею поверхнею;
- 2) опадоміри встановлюють на метеорологічних майданчиках, який би не був ступінь їх захисту, а на опадомірних постах прилад, як правило, встановлюють на присадибній ділянці вдома, де проживає спостерігач, і в більшості випадків опиняється напівзахисченим.

Вимірювання на метеорологічному майданчику здійснюють у відповідності до Р52.08.657-2004.

Як показали дослідження, не тільки дощомір, але і опадомір дає, хоч і в різній мірі, але все ж значно спотворені величини опадів, особливо твердих, головним чином, в бік їх зменшення. Обидва прилади, як правило, недораховують опади.

Врахування рідких опадів мережевими опадомірами є більш точним, але в мережі похибки у більшості випадків стільки значимі, що не враховувати їх неможливо. Вони зростають зі збільшенням швидкості вітру. В роботах В.С. Голубєва похибки врахування рідких опадів, виміряних опадоміром Третьякова, оцінені в межах 5–15 %, при великій швидкості вітру сягають 20 %.

Основні похибки:

1. Недоврахування опадів, викликане випаровуванням поля швидкостей вітру при обтіканні опадоміра.
2. При обтіканні будь-якої природної перешкоди (горба, будівлі, гаю і т.д.) також виникають спотворення поля швидкості вітру. В результаті виникає так званий вітровий перерозподіл опадів. Способів боротьби з цим ефектом практично немає. Враховувати його можна лише шляхом суттєвого збільшення кількості опадомірів. Цей ефект є одним із основних причин так званої строкатості опадів, їх варіації за площею.
3. Перерозподіл опадів під впливом горизонтального градієнту швидкості вітру природно тим більше, чим сильніше вітер і менші краплі.
4. При вимірюванні твердих опадів в тій чи іншій мірі доводиться рахуватись зі спотвореннями, які виникають в умовах хурделиць. Вони полягають в переносі снігу, піднятого з поверхні снігового покриву і надуванні в опадомір «фальшивих» опадів. Це є суттєвим лише для боротьби з таким ефектом, тому у нас застосовують надвисоку в світі установку опадомірів – 2 м.
5. При обтіканні опадоміру на краях приймальної посудини утворюються завихрення, які при недостатній глибині відра досягають його дна. Відбувається видування зібраних твердих опадів. Ефект тим сильніший, чим сильніше вітер, чим менше відношення глибини відра до його діаметру. Він майже відсутній у опадоміра Третьякова.
6. Деяка кількість як рідких, так і твердих опадів завжди недораховуються через втрати на змочування стінок посудини. І.Н. Нечасєв запропонував додавати 0,2 мм кількості опадів за одне вимірювання. В річній їх сумі поправки сягають 5–12 %, а іноді і більше.



7. Помітні спотворення можуть вносити втрати зібраних опадів на випаровування. В деяких випадках вони можуть сягати до 100 %.
8. Розбризкування крапель від ударів по стінках посудини. У опадоміра Третьякова конструкція приймального відра така, що втрати опадів через розбризкування практично відсутні.
9. Забризкування крапель в посудину. Ефект особливо важливо враховувати у наземних дощомірів.
10. Налипання мокрого снігу і обледеніння поверхні приймального відра та вітрового захисту позначають далеко не завжди і не всюди, але можуть викликати істотне порушення роботи опадомірів, особливо тих, які тривалий час не обслуговуються.

Сумарний вплив всіх факторів приводить до строкатої і заплутаної картини при кількісній оцінці похибки. Однак головним фактором, який визначає похибки опадів є швидкість вітру.

Поправку 0,2 мм на змочування опадоміра потрібно враховувати при кожному вимірюванні. Результати обчислень показують, що недоврахування опадів через втрати на змочування сягає значної величини. Найбільше недоврахування, близьке до 20 % місячної суми, відмічали в зимовий період. Пояснюється це тим, що опади випадають часто і потроху, кількість вимірювань велика, тому і великі втрати на змочування поверхні відра. В літній час опади більш рясні і кількість вимірювань менше, тому відносне недоврахування не перевищує 8 %.

За результатами багаторічних досліджень було встановлено, що незначна, при слабких вітрах, вітрова похибка зростає до 8–10 % від фактичної суми опадів при швидкості вітру під час дощу 6–8 м/с.

**Таблиця 6.1 – Недоврахування опадів залежно від швидкості вітру**

Швидкість вітру, м/с	Поправка, %
0 – 2	4
2 – 4	5
4 – 6	7
6 – 8	8
8 – 10	10
Більше 10	11

Величина вітрового недоврахування рідких опадів в середньому складає за попередньою оцінкою 5–7 % і сягає, в окремих випадках, 10–11 % при швидкостях вітру 8–10 м/с.

При обробці результатів вимірювань опадів, виражених в поділках шкали вимірювальної склянки, здійснюють такі операції:

- виражають виміряну кількість опадів в міліметрах,
- вводять поправки до результатів вимірювань опадів і обчислюють їх дійсне значення.

Для вираження виміряної кількості опадів в міліметрах результат вимірювання, виражений в поділках шкали вимірювальної склянки, ділять на 10 і записують у відповідну графу книжки спостережень, включаючи першу цифру після коми.

Обчислення дійсних значень виміряних опадів  $P$  (мм) виконують за формулою

$$P = K(P'' + \Delta P - P''_{f1} - P''_{f2}), \quad (6.1)$$

де  $K$  – поправочний коефіцієнт, що враховує систематичну похибку, яка пов'язана з впливом аеродинамічних факторів на результат вимірювань опадів опадоміром;

$P''$  – результат виміряних опадів у мірній склянці (мм);

$\Delta P$  – поправка, яка компенсує систематичні похибки вимірювання опадів, що виникають внаслідок змочування внутрішньої поверхні опадозбірної посудини, виправлення опадів із нього і конденсації вологи на поверхні його внутрішніх стінок (мм);

$P''_{f1}$  – поправка, яка враховує кількість хибних опадів, що потрапили в опадомір за час загальної заметілі (мм);

$P''_{f2}$  – поправка, яка враховує кількість хибних опадів, що потрапили в опадозбірник за час низової заметілі (мм).

Поправочний коефіцієнт  $K$  розраховують за даними строкових спостережень за формулою

$$K = 1 + A_0 \frac{\sum_{\tau}^n (\mu(\tau) U_h(\tau))^2}{n}, \quad (6.2)$$

де  $A_0$  – емпіричний параметр (табл. 6.2);

$\mu(\tau)$  – коефіцієнт переходу від значень щільності повітря за стандартних параметрів атмосфери до значень щільності за реальних умов;

$U_h(\tau)$  – швидкість вітру на висоті приймального отвору опадозбірної посудини (м/с);

$n$  – кількість строків спостережень за метеорологічними характеристиками між строками вимірювань опадів (для першого і дру-

гого годинних поясів  $n=2$  або  $n=4$ , для інших годинних поясів  $n=5$ ).

**Таблиця 6.2 – Значення емпіричного параметра  $A_0$  для опадів різних видів**

Вид опадів	$A_0$
Сніг (сніг, сніг зливовий, сніг мокрий, сніг зливовий мокрий, льодяні голки, заметіль низова, заметіль загальна)	0,033
Дощ (дощ, дощ зливовий, град, зерна сніжні, крупа снігова, крупа льодяна, льодяний дощ)	0,008 при $t_a \leq 2^\circ\text{C}$ 0,004 при $t_a > 2^\circ\text{C}$
Мряка	0,017
Мряка + сніг	0,025
Мряка + дощ	0,008 при $t_a \leq 2^\circ\text{C}$ 0,004 при $t_a > 2^\circ\text{C}$
Змішані опади (поперемінне або одночасне випадіння дощу і снігу)	0,017

Параметр  $\mu(\tau)$  в кожен строк спостережень за метеорологічними характеристиками обчислюють за формулою

$$\mu(\tau) = \frac{P_a(\tau)}{1000} \frac{273}{273 + t_a(\tau)} \cdot \frac{P_a(\tau)}{P_a(\tau) + 0,4 \cdot e_a(\tau)}, \quad (6.3)$$

де  $P_a(\tau)$  – атмосферний тиск на станції в строк спостереження (гПа);

$t_a(\tau)$  – температура повітря ( $^\circ\text{C}$ );

$e_a(\tau)$  – парціальний тиск водяного пару (гПа).

При відсутності даних на станції спостережень за атмосферним тиском параметр  $\mu(\tau)$  розраховують за формулою

$$\mu(\tau) = 1,013 \left( 1 - \frac{0,0065H}{288} \right)^{5,255} \frac{273}{273 + t_a(\tau)}, \quad (6.4)$$

де  $H$  – висота метеомайданчика над рівнем моря (м).

Значення швидкості вітру  $U_h(\tau)$  (м/с) на висоті приймального отвору опадозбірника  $h$  (м) в строк спостережень метеорологічних характеристик обчислюють за формулою

$$U_h(\tau) = U_{H_\phi}(\tau) m(A) \frac{\ln \frac{h - h_s}{z_0}}{\ln \frac{H_\phi - h_s}{z_0}}, \quad (6.5)$$

де  $U_{H_\phi}(\tau)$  – швидкість вітру на висоті анеморумбометра (флюгера) в строк спостережень (м/с);

$m(A)$  – коефіцієнт, який характеризує спотворення логарифмічного профілю вітру під впливом вітрового захисту метеорологічного майданчика;

$h_s$  – висота снігового покриву на метеорологічному майданчику, яка визначається за даними щоденних вимірювань за постійними снігомірними рейками (м);

$z_0$  – висота динамічної шорсткості на метеорологічному майданчику і навкруги; при суцільному сніговому покриві  $z_0 = 0,01$  м, при трав'яному покриві і строкатому ландшафті (ступінь покриття площі і навколишніх околиць снігом менше 6 балів)  $z_0 = 0,03$  м;

$H_\phi$  – висота анеморумбометра (флюгера) (м).

Коефіцієнт  $m(A)$  розраховують за формулою

$$m(A) = 1 - 0,024\alpha(A)c, \quad (6.6)$$

де  $\alpha(A)$  – кут закритості горизонту в напрямку вітру ( $A$ ) у даний строк спостережень (по 16 румбам) (град.);

$c$  – коефіцієнт, що характеризує тип об'єкту, який закриває горизонт, і його віддаленість від опадоміру (табл. 6.3).

**Таблиця 6.3– Коефіцієнт  $c$**

Тип об'єкту	Відстань до об'єкту, м	Горизонтальна протяжність об'єкту, градуси центрального кута	$c$
Всі типи вітрових перешкод	Більше 300	Від 1 до 360°	0
Поодинокі дерева, будівлі та інші вітрові перешкоди	300 і менше	Менше 36°	0,5
Примикаючі один до одного будівлі, дерева, лісні смуги або інші вітрові перешкоди	300 і менше	Більше 36°	1,0

Значення поправки, яка компенсує систематичну похибку вимірювання опадів внаслідок змочування, випаровування і конденсації  $\Delta P$  (мм), розраховують залежно від вигляду опадів і відносної волостості повітря наступним чином:

- у випадку вимірювання рідких опадів, а саме мряки, дощу, дощу зливового, граду, дощу льодяного,

$$\text{при } r \leq 95 \% \quad \Delta P = 0,069 \ln(100 - r) + 0,009 \quad (6.7)$$

$$\text{при } r > 95 \% \quad \Delta P = 0,1.$$

де  $r$  – відносна вологість повітря, осереднена за всіма строковими її значеннями  $r_a(\tau)$  від строку установки опадоскидної посудини до строку вимірювання опадів (зміни посудини) включно (%);

- у випадку вимірювання твердих опадів, а саме крупи льодяної, крупи сніжної, зерен сніжних, голок льодяних, снігу, снігу зливогого, заметілі низової, заметілі загальної,

$$\text{при } r \leq 95 \% \quad \Delta P = 0,067 \ln(100 - r) + 0,15, \quad (6.8)$$

$$\text{при } r > 95 \% \quad \Delta P = -0,2.$$

- у випадку вимірювання змішаних опадів, а саме снігу мокрого, снігу зливогого мокрого, попереминого або одночасного випадіння рідких і твердих опадів за весь період між строками вимірювання опадів,

$$\text{при } r \leq 95 \% \quad \Delta P = 0,158 \ln(100 - r) - 0,449, \quad (6.9)$$

$$\text{при } r > 95 \% \quad \Delta P = -0,2.$$

При розрахунку дійсних значень опадів за формулою (6.1) приймається  $P=0$  при  $P'' + \Delta P < 0$ .

Кількість хибних опадів за час загальної заметілі  $P''_{f1}$  обчислюють за формулою

$$P''_{f1} = \sum_1^{n_1} J_{f1}^i \tau_{f1}^i, \quad (6.10)$$

де  $J_{f1}^i$  – середня інтенсивність хибних опадів, які вловлюються в опадозбірній посудині, за період, в якому спостерігалась загальна заметіль, між двома строками спостережень за метеорологічними характеристиками (мм/год.);

$\tau_{f1}^i$  – тривалість загальної заметілі за цей же період ( $\tau_{f1}^i < 3$  год.);

$n_1$  – кількість періодів спостережень, в які спостерігали загальну заметіль ( $n_1 < n - 1$ ).

Середню інтенсивність хибних опадів  $J_{f1}$  за рахунок загальної заметілі в строк спостережень обчислюють за формулою

при  $U_h(\tau) > 4,2$  м/с

$$J_{f1} = 0,033 \left( U_h^{2,2} - 4,2^{2,2} \right) \frac{1}{K_{t1} U_h} B_h L_{t1}, \quad (6.11)$$

при  $U_h(\tau) \leq 4,2$  м/с  $J_{f1}^i = 0$ .

Коефіцієнт захвату дефляційних частинок при загальній заметілі дорівнює відхиленню  $1/K_{f1}$ . Коефіцієнт  $K_{f1}$  обчислюють за формулою

$$K_{f1} = 1 + 0,0215 \mu^2(\tau) U_h^2(\tau), \quad (6.12)$$

Значення  $\mu(\tau)$  і  $U_h(\tau)$  розраховують за формулами (6.3) або (6.4) і за формулою (6.5), відповідно.

Коефіцієнт, який враховує концентрацію дефляційних частинок на висоті приймального отвору опадоскидної посудини  $B_h$ , обчислюють за формулою

$$B_h = \frac{2}{h - h_s} \ln \frac{2}{z_0} \left( \ln \frac{h - h_s}{z_0} \right)^{-1}, \quad (6.13)$$

де  $h$  – висота приймального отвору опадозбірної посудини над поверхнею землі (м);

$h_s$  – висота снігового покриву на метеорологічному майданчику, яка визначається за даними щоденних вимірювань за постійними снігомірними рейками (м);

$z_0$  – параметр шорсткості майданчика (м).

Коефіцієнт, який враховує насиченість заметілі  $L_{f1}$  обчислюють за формулою

$$L_{f1} = th \frac{3l(A)}{1000}, \quad (6.14)$$

де  $th$  – гіперболічний тангенс,

$l(A)$  — довжина розгону заметілі за даним напрямком вітру (м).

Кількість хибних опадів, що потрапили в опадозбірну посудину за час низової заметілі  $P''_{f2}$  (мм), обчислюють за формулою

$$P''_{f2} = \sum_1^{n_2} J_{f2}^i \tau_{f2}^i, \quad (6.15)$$

де  $J_{f2}^i$  – середня інтенсивність хибних опадів за рахунок низової заметілі за період, в якому спостерігалась низова заметіль, між двома строками спостережень за метеорологічними характеристиками (мм/год.);

$\tau_{f2}^i$  – тривалість низової заметілі за цей же період ( $\tau_{f2}^i \leq 3$  год.);

$n_2$  – кількість проміжків спостережень, в які спостерігалась низова заметіль ( $n_2 \leq n-1$ ).

Інтенсивність хибних опадів при низовій заметілі в строк спостережень обчислюють за однією з трьох формул (6.16)–(6.18), які відповідають стану снігового покриву перед початком низової заметілі. Вибирають формулу залежно від послідовності фіксації часу снігопаду, загальної і низової заметілі.

У всіх випадках, коли низову заметіль відмічають після снігопаду (снігу, зливого снігу і (або) загальної заметілі), величину  $J_{f2}$  розраховують за формулою

при  $U_h(\tau) > 4,2$  м/с

$$J_{f2}(\tau) = 0,00161 \left( U_h^{2,8}(\tau) - 4,2^{2,8} \right) \frac{1}{K_{f2} U_h(\tau)} B_h L_{f2}, \quad (6.16)$$

при  $U_h(\tau) \leq 4,2$  м/с  $J_{f2}(\tau) = 0,$

$$L_{f2} = th \frac{3l_{f2}(A)}{1000}.$$

У тих випадках, коли низову заметіль відмічають після поземки,  $J_{f2}$  обчислюють за формулою

при  $U_h(\tau) > 6,0$  м/с

$$J_{f2}(\tau) = 3,08 \cdot 10^{-4} \left( U_h^4(\tau) - 6^4 \right) \frac{1}{K_{f2} U_h(\tau)} B_h L_{f2}, \quad (6.17)$$

при  $U_h(\tau) \leq 6$  м/с  $J_{f2}(\tau) = 0,$

$$L_{f2} = th \frac{2l_{f2}(A)}{1000}.$$

У всіх інших випадках  $J_{f2}$  обчислюють за формулою

при  $U_h(\tau) > 8,5$  м/с

$$J_{f2}(\tau) = 8,9 \cdot 10^{-6} \left( U_h^{5,1}(\tau) - 8,5^{5,1} \right) \frac{1}{K_{f2} U_h(\tau)} B_h L_{f2}, \quad (6.18)$$

при  $U_h(\tau) \leq 8,5$  м/с  $J_{f2}(\tau) = 0,$

$$L_{f2} = th \frac{l_{f2}(A)}{1000}.$$

---

**Примітки:**

1. Якщо перед низовою заметіллю спостерігалась також низова заметіль і період між кінцем попередньої низової заметілі і початком аналогічної низової заметілі був більше 6 год., використовують формулу (6.18). Якщо цей період менше 6 год., тоді використовують формулу, яка була отримана для попередньої низової заметілі.
2. Аналіз явища, попередньої низової заметілі, здійснюється не більше, ніж на 5 діб до цього або до 1-го строку 1-го числа місяця. При відсутності опадоутворюючих явищ за цей період використовують формулу (6.18).
3. Коефіцієнт захвату дефляційних частинок в формулах (6.17)—(6.18) при низовій заметілі дорівнює відношенню  $\frac{1}{K_{f2}}$ . Коефіцієнт  $K_{f2}$  обчислюють за формулою

$$J_{f2} = 1 + 0,01\mu^2(\tau)U_h^2(\tau). \quad (6.19)$$

Значення  $\mu(\tau)$  і  $U_h(\tau)$  обчислюють за формулами (6.3) або (6.4) і за формулою (6.5) відповідно.

4. Коефіцієнт  $B_h$  розраховують за формулою (6.13).
5. Дійсне значення опадів, обчислене за формулою (6.2), приймають рівним нулю ( $P=0$ ), якщо  $P'' + \Delta P - P''_{f1} - P''_{f2} < 0$ .

---

Коефіцієнт  $m(A)$  характеризує спотворення логарифмічного профілю вітру під впливом захищеності метеорологічного майданчика. Значення коефіцієнту  $m(A)$  обчислюють за формулою

$$m(A) = 1 - 0,024\alpha(A)c, \quad (6.20)$$

де  $\alpha(A)$  – кут закритості горизонту за напрямками вітру за одним із 16 румбів (град.);

$c$  – коефіцієнт, значення якого призначають за табл. 6.3, залежно від типу вітрової перепони (об'єкта) і його віддаленості від опадоміра (метеорологічного майданчика).

Захищеність метеорологічного майданчика оцінюють значенням вертикального кута закритості горизонту  $\alpha(A)$  для кожного із 16 румбів або відповідних йому значень азимуту.

Значення кута закритості горизонту визначають на підставі відомостей, що зберігаються в «Технічній справі метеорологічної станції», де є історичні відомості про результати інструментальних визначень  $\alpha(A)$  для кожного з 16 румбів (азимутів) і описання найближчого оточення метеорологічного майданчика в радіусі до 300 м.

У тих випадках, коли в «Технічній справі метеорологічної станції» графік закритості горизонту метеорологічного майданчика відсутній, значення  $\alpha(A)$  слід визначати за допомогою кутомірного інструменту безпосередньо в пункті вимірювання атмосферних опадів.



У випадку відсутності кутомірного інструменту оцінка вітрової захищеності опадоміра може бути виконана шляхом визначення перевищення вітрової перепони над приймальним отвором опадозбірної посудини  $\Delta H$  (м) і відстані до нього від опадомірної установки  $L$  в радіусі до 300 м для кожного з 16 румбів. У цьому випадку кут закритості горизонту розраховують за формулою

$$a = \operatorname{arcth}\left(\frac{\Delta H}{L}\right), \quad (6.21)$$

$$\Delta H = H - 2, \quad (6.22)$$

де  $H$  – висота перешкоди (м),

$L$  – відстань до перешкоди від опадоміра (м).

Допустимо в якості тимчасової заходу визначати характеристики вітрової захищеності метеорологічного майданчика за словесним описом найближчого до (300 м) околиці майданчика. В цьому випадку із опису слід відібрати відомості про тип і висоту вітрових перешкод (об'єктів), а також про відстані до них за кожним із 16 румбів. Потім, способом, викладеним вище, слід обчислити значення  $\alpha(A)$  і оцінити за формулою (6.20) значення коефіцієнту  $m(A)$ .

Значення коефіцієнту  $m(A)$  для кожного пункту спостережень за атмосферними опадами, як історичні, так і поточні, слід зберігати в «Технічній справі метеорологічної станції».

## 6.2. Визначення об'єму втрат води на поверхневий та глибинний скид

При розрахунках режимів зрошення сільськогосподарських культур необхідно мати на увазі, що поверхневий стік ( $Y$ ) та фільтрація в підземні води або нижче розташовані шари ґрунту ( $I$ ) протягом вегетаційного періоду порівняно невеликі і тому, в більшості випадків, їх приймають рівними нулю.

Поверхневий стік виникає в тому випадку, коли атмосферні опади перевищують інфільтрацію протягом періоду часу, достатньо великого, для того, щоб ями та інші пониження мікрорельєфу встигли заповнитись водою.

Роль рослинності полягає в підвищенні інфільтрації, завдяки чому зменшується об'єм стоку. Крім того, рослинність зменшує швидкість за каналами первинної гідрографічної мережі, тобто збільшує час добігання (Пенман Х.Л., 1968).

Глибинний скид відбувається в тому разі, коли кореневмісний шар ґрунту буде зволожений вище найменшої вологості (НВ).

При зрошенні величину і інтенсивність зволоження проєктують так, щоб зволожувався тільки активний шар ґрунту без поверхневого і глибинного скиду. Такі процеси можливі тільки при випадінні природних атмосферних опадів, особливо при затяжних і зливових їх проявах. При зрошенні ці ситуації виникають значно частіше, так як природні дощі випадають на більш зволожений ґрунт, а ніж на незрошувані землі.

Втрати води на поверхневий і глибинний скид вирівнюються за рахунок зменшення кількості атмосферних опадів в рівнянні водного балансу

$$Y + I = (1 - \mu) \cdot P = \Delta P, \quad (6.23)$$

тобто формулу (3.5) можна представити у вигляді

$$W_i = W_{i-1} + \mu P_i + W_{zp} - E_i + m_i, \quad (6.24)$$

де  $Y$  – скид поверхневих вод;

$I$  – інфільтрація ґрунтової вологи в нижче розташовані горизонти;

$\mu$  – коефіцієнт використання атмосферних опадів на поповнення ґрунтової вологи;

$P$  – атмосферні опади;

$\Delta P$  – втрати атмосферних опадів на фільтрацію і поверхневий скид.

За даними О.В. Процєрова, коефіцієнт поглинання ґрунтом літніх опадів на Півдні України в середньому за вегетацію для просапних культур складає не менше 0,7 і для вузькорядних – 0,6.

В.В. Колпаков для Півдня України в середній за вологістю рік для польових культур наводить коефіцієнт  $\mu=0,65-0,70$ .

Б.О. Шумаков при розробці поливних режимів сільськогосподарських культур (для основних зрошуваних районів) отримав такі коефіцієнти поглинання опадів:

- за холодний період (грудень – березень) – 0,5;
- за весняно-літній (квітень – червень) – 0,6;
- за липень – серпень – 0,3;
- вересень – 0,5;
- жовтень – листопад – 0,7.

При достатньо великих запасах вологи в ґрунті (НВ і більше) має місце скид надлишку води в нижче розташовані шари ґрунту. В цьому випадку вологозапаси на кінець розрахункового періоду ( $W_i$ ) ре-

комендують приймати близькими до НВ, а надлишок у рівнянні водного балансу вирівнювати за рахунок вертикального чи поверхневого скиду частини опадів, тобто за рахунок  $Y$  та  $I$ . При зрошенні такі випадки зустрічаються значно частіше, ніж при природному зволоженні.

### **6.3. Визначення інтенсивності підживлення ґрунтовими водами розрахункового кореневмісного шару ґрунту**

Роль ґрунтових вод в забезпеченні рослин вологою залежить від глибини їх залягання, потужності кореневої системи рослин, літологічної будови зони аерації, а також частоти змочування поверхні ґрунту атмосферними опадами та поливами.

Ґрунтові води застосовують для зволоження ґрунтів в зоні осушення, коли відбувається їх пересушення в посушливий період року. Це так звані осушувально-зволожувальні системи або системи двосторонньої дії. В цій зоні, як правило, ґрунтові води залягають неглибоко і вони мають невелику мінералізацію. Для зволоження кореневмісного шару та підняття ґрунтових вод, або припиняють їх скид (попереджувальне шлюзування), або навіть подають додаткову кількість води (зволожувальне шлюзування).

В зрошуваній зоні України ґрунтові води, як правило, залягають глибоко і мають підвищену мінералізацію через малу їх проточність і посушливий клімат. При близькому їх заляганні значна їх кількість витрачається на випаровування. Дистильована вода з них випаровується, а солі, що знаходяться в цих водах залишаються і з часом накопичуються. Тому, частіше за все, на півдні України стоїть питання про недопущення підняття ґрунтових вод за рахунок регулювання режиму зрошення і дренажу. На понижених ділянках з неглибоким заляганням ґрунтових вод (подах і блюдцях) спостерігається природне (первинне засолення). На таких ділянках проєктують промивки для видалення надлишку солей на фоні дренажу.

Однак є виключення, де зустрічаються сприятливі гідрогеологічні умови, з неглибоким заляганням прісних ґрунтових вод. В цьому випадку зменшують інтенсивність зрошення (поливні норми і кількість поливів). Оптимальний режим зволоження підтримується в основному за рахунок підживлення прісними ґрунтовими водами. При відсутності експериментальних даних для врахування капілярного жив-

лення ґрунтових вод можна застосувати декілька розрахункових методів.

Інтенсивність витрат ґрунтових вод на сумарне випаровування визначається, крім погодних умов, вологозапасів і біологічних властивостей рослин, головним чином, глибиною їх залягання, ступенем мінералізації і водно-фізичними властивостями ґрунтів.

### 6.3.1. Визначення живлення ґрунтовими водами за І.А. Шаровим

Живлення ґрунтовими водами розрахункового шару ґрунту за весь вегетаційний період можна знайти залежно від глибини їх залягання та гранулометричного складу (табл. 6.4).

*Таблиця 6.4 – Живлення кореневмісного шару ґрунту ґрунтовими водами*

Гранулометричний склад ґрунту	Глибина залягання ґрунтових вод, м		
	1,0-1,5	1,5-2,0	2,5-3,0
Супіщані	800-1000	-	-
Легкі суглинки	1000-1200	500-800	-
Середні суглинки	1200-1400	700-900	-
Важкі суглинки	1400-1800	1000-1200	600-800
Глинисті	2000-2500	1400-1600	1000-1200

Цей метод визначення  $W_{zp}$  застосовують при розрахунках режиму зрошення за О.М.Костяковим. В середині вегетаційного періоду  $W_{zp}$  розподіляється пропорційно структурі водоспоживання.

Рівень залягання ґрунтових вод, як правило, протягом вегетаційного періоду змінюється. Нажаль, цей метод не дає можливості врахувати цю зміну.

### 6.3.2. Визначення живлення ґрунтовими водами за С.М. Алпатьяєвим

Величину використання ґрунтових вод визначають залежно від сумарного водоспоживання  $E$

$$W_{zp} = E \cdot k_{zp}, \quad (6.25)$$

де  $k_{zp}$  – коефіцієнт капілярного живлення, який залежить від глибини залягання ґрунтових вод та глибини кореневмісного шару ґрунту (табл. 6.5).

**Таблиця 6.5 – Значення коефіцієнта капілярного живлення  $k_{zp}$**

Глибина залягання прі- сних ґрунтових вод, м	Агрофон			
	поверхня без рослин	культура з кореневою системою		
		до 0,6 м	до 1 м	більше 1 м
<i>Легкі за гранулометричним складом ґрунти</i>				
0,5	0,45	0,85	1,00	1,00
1,0	0,15	0,40	0,55	0,90
1,5	-	0,15	0,25	0,55
2,0	-	-	0,10	0,30
2,5	-	-	-	0,15
3,0	-	-	-	0,05
<i>Важкі за гранулометричним складом ґрунти</i>				
0,5	0,55	0,75	1,00	1,00
1,0	0,25	0,35	0,50	0,95
1,5	0,05	0,20	0,30	0,65
2,0	-	0,05	0,15	0,40
2,5	-	-	0,05	0,25
3,0	-	-	0,00	0,10

Якщо ґрунтові води мінералізовані, то наведені значення коефіцієнта  $k_{zp}$  необхідно зменшити в 1,5-2,0 рази. При наявності неглибокого залягання мінералізованих ґрунтових вод можливе інтенсивне вторинне засолення ґрунтів, яке ця методика не враховує. Тоді, в такому випадку, не потрібно допускати близького залягання ґрунтових вод, наприклад, за допомогою будівництва горизонтального чи вертикального дренажу. Хоча це потребує додаткових затрат на дренаж і на зрошення, але запобігає зменшенню родючості ґрунту через вторинне засолення.

Цей метод визначення  $W_{zp}$  розроблений для розрахунку режиму зрошення за методом А.М. та С.М. Алпатьєвих, але часто його застосовують і при розрахунках іншими методами.

### **6.3.3. Визначення живлення ґрунтовими водами за формулою С.І. Харченка**

На підставі лізіметричних спостережень С.І. Харченко запропонував формулу для розрахунку величини втрат ґрунтових вод в зону аерації

$$W_{zp} = E_0 \cdot e^{-m \cdot H}, \quad (6.26)$$

де  $E_0$  – випаровуваність, мм;

$H$  – глибина залягання ґрунтових вод, м;

$e$  – основа натурального логарифму;

$m$  – параметр, що залежить від ґрунту та стадії розвитку рослин.

**Таблиця 6.6 – Значення коефіцієнту  $m$  в формулі (6.26)**

Тип ґрунту	Період до сівби та перша декада після посіву	Друга декада після посіву	Декади в період активної вегетації	Передостання декада перед датою повної стиглості	Остання декада та під час збирання врожаю і після неї
Глинисті	1,2	0,9	0,7	0,9	1,2
Суглинисті	1,4	1,0	0,8	1,0	1,4
Супіски	2,0	1,6	1,1	1,6	2,0

Цей спосіб визначення  $W_{zp}$  розроблений для комплексного методу розрахунку режиму зрошення. Крім того цю формулу застосував і В.П. Остапчик для розрахунку режиму зрошення удосконаленим біокліматичним методом при розробці інформаційно-дорадчої системи оперативного планування поливів.

У подальшому формула С.І. Харченка була вдосконалена Р.А. Баєром

$$W_{zp} = 0,9k_{mn}^2 \cdot E_0 \cdot e^{-m \cdot H}, \quad (6.27)$$

де  $k_{mn}^2$  – коефіцієнт участі ґрунтових вод у водозабезпеченості рослин залежно від їх мінералізації. Він відображає відношення допустимої в конкретних умовах мінералізації  $M_n^{(0)}$ , г/л до фактичної  $M_n^{(\phi)}$ . Значення  $k_{mn}^2$  змінюються від 1 до –0,2 (табл. 6.7).

Коефіцієнт  $k_{mn}^2$  залежить від приведеної мінералізації, яку визначають за формулою

$$M_n^{np} = \frac{M_n^{\phi}}{M_n^D}, \quad (6.28)$$

де  $M_n^{\phi}$  – фактична мінералізація, г/л;

$M_n^D$  – допустима мінералізація, г/л.

$k_{mn}$  визначається за даними табл. 6.7. Допустима мінералізація  $M_n^D$  залежить від глибини залягання ґрунтових вод та визначається за табл. 6.8

**Таблиця 6.7 – Залежність величини коефіцієнту  $k_{mn}$  від приведеної їх мінералізації  $M_n^{np}$**

$M_n^{np}$	$k_{mn}$	$M_n^{np}$	$k_{mn}$
1,0	1,0	2,0-3,0	0,1
1,0-1,2	0,8	3,0-4,0	-0,1
1,2-1,6	0,6	4,0-4,6*	-0,2
1,6-2,0	0,3		

\*Тільки на фоні дренажу

**Таблиця 6.8 – Залежність допустимої мінералізації ґрунтових вод  $M_n^D$ , г/л, від глибини їх залягання  $h_{zp}$ , м**

$h_{zp}$	$M_n^D$	$h_{zp}$	$M_n^D$	$h_{zp}$	$M_n^D$
1,0	2	2,5	12	4,0	26
1,5	3	3,0	17	4,5	30
2,0	7	3,5	21	5,0	30

Крім стандартних методів врахування підживлення ґрунтовими водами застосовують локальні методи, розроблені для певних територій і сільськогосподарських культур. Так, на Півдні України з неглибоким заляганням немінералізованих і слабо мінералізованих ґрунтових вод з середніми і важкими ґрунтами за даними Р.Н. Олійник і Н.Г. Шелудько ступінь підживлення ґрунтових вод наведена в табл. 6.9.

Одеською гідрогеолого-меліоративною експедицією для зрошуваних земель була розроблена методика врахування підживлення ґрунтовими водами кореневмісного шару ґрунту через зменшення сумарного випаровування. Вважалось, що при близькому заляганні рівня ґрунтових вод необхідно зменшити сумарне випаровування на коефіцієнт  $k_{zp}$  величина якого залежить від глибини залягання ґрунтових вод і фази розвитку рослин (табл. 6.10).

**Таблиця 6.9 – Зміна протягом вегетаційного періоду величини участі ґрунтових вод в сумарному випаровуванні зрошуваної кукурудзи від глибини їх залягання**

Глибина залягання ґрунтових вод, м	Міжфазний період					
	сходи – 7-й листок	7-й – 11-й листок	11-й листок – викидання волоті	викидання волоті – квітування	квітування – молочна стиглість	молочна стиглість – повна стиглість
0,5	0,29	0,51	0,90	1,00	1,00	1,00
1,0	0,20	0,34	0,60	0,76	0,84	0,92
1,5	0,12	0,20	0,36	0,45	0,50	0,54
2,0	0,07	0,12	0,22	0,28	0,32	0,35
2,5	0,04	0,06	0,11	0,13	0,15	0,17
3,0	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,09

**Таблиця 6.10 – Поправочні коефіцієнти до сумарного випаровування вологи із розрахункового шару ґрунту при різній глибині залягання слабомінералізованих ґрунтових вод (Одеська ГТМЕ)**

Період росту та розвитку сільськогосподарських культур	Глибина залягання ґрунтових вод, м						
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
1	2	3	4	5	6	7	8
Пшениця озима:							
відновлення вегетації – 10 днів після трубкування	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99	1,00	1,00
– початок молочної стиглості	0,50	0,68	0,77	0,83	0,87	0,92	0,94
– воскова стиглість	0,40	0,63	0,79	0,88	0,94	1,00	1,00
Ярові зернові							
посів – вихід в трубку	0,81	0,87	0,92	0,97	0,99	1,00	1,00
– початок молочної стиглості	0,50	0,65	0,75	0,82	0,88	0,94	1,00
– повна стиглість	0,40	0,58	0,72	0,84	0,94	1,00	1,00
Кукурудза							
посів – поява 9-го листка	0,79	0,90	0,94	0,98	0,99	1,00	1,00
– викидання волоті	0,51	0,70	0,83	0,90	0,95	0,99	1,00
– повна стиглість	0,20	0,41	0,60	0,75	0,85	0,94	1,00
Буряки цукрові та кормові							
посів – початок змикання листків між рядками	0,57	0,80	0,88	0,95	0,97	1,00	1,00
– кінець вегетації	0,27	0,54	0,70	0,77	0,84	0,89	0,96
Картопля							
сходи – квітування	0,61	0,84	0,95	0,99	1,00	1,00	1,00
– жовтіння бадилля	0,31	0,58	0,75	0,88	0,99	1,00	1,00
Овочі							
весь період вегетації	0,62	0,78	0,88	0,96	1,00	1,00	1,00
Люцерна другого та третього року							
весь період вегетації	0,17	0,37	0,56	0,70	0,80	0,89	0,96



### **Питання для самоконтролю**

1. Як встановлюють суму атмосферних опадів за розрахунковий період?
2. Від чого залежать похибки вимірювання атмосферних опадів?
3. Як розраховують поправки для уточнення суми атмосферних опадів?
4. Від чого залежить об'єм втрат води на поверхневий і глибинний скид?
5. Від чого залежить підживлення ґрунтовими водами кореневмісного шару ґрунту?
6. Які методи розрахунку підживлення ґрунтовими водами застосовують при розрахунку режимів зрошення?
7. Як гранулометричний склад ґрунту впливає на підживлення ґрунтовими водами кореневмісного шару ґрунту?
8. Яким чином враховують вплив сільськогосподарських культур на підживлення близькорозташованими ґрунтовими водами?
9. Як враховують мінералізацію ґрунтових вод на величину їх підживлення кореневмісного шару ґрунту?

## 7. ЗРОШУВАЛЬНА І ПОЛИВНА НОРМА

### 7.1. Зрошувальна норма

*Зрошувальна норма* – об'єм води, що подається на зрошуваний гектар за весь вегетаційний період. Її визначають як різницю між сумарною потребою культури у воді та її природною вологозабезпеченістю, і вимірюють в м<sup>3</sup>/га або в мм шару води.

Зазвичай вона відповідає дефіциту водоспоживання культури за вегетаційний період

$$M = \sum D_i, \quad (7.1)$$

де  $M$  – зрошувальна норма;

$\sum D_i$  – сумарний дефіцит водоспоживання за вегетаційний період.

За формулою О.М. Костякова зрошувальну норму визначають як

$$M = E - \mu P - W_{ep} - \Delta W, \quad (7.2)$$

де  $E$  – сумарне водоспоживання сільськогосподарської культури за вегетаційний період;

$\mu P$  – ефективні атмосферні опади за період вегетації;

$W_{ep}$  – підживлення ґрунтових вод;

$\Delta W$  – активні запаси вологи на початку вегетації, які можуть використовуватись протягом всієї вегетації.

У випадку, коли розрахунок запасів вологи ведуть послідовно за формулою (3.5) або (6.24), зрошувальну норму знаходять як суму поливних норм, тобто  $M = \sum m$ .

#### **Приклад 7.1. Розрахувати зрошувальну норму для кукурудзи на зерно:**

- сумарне водоспоживання – 4200 м<sup>3</sup>/га;
- атмосферні опади за вегетацію – 193 мм;
- ґрунтові води залягають глибоко – більше 5 м;
- запаси вологи на початок вегетації знаходяться на рівні НВ – 327 мм;
- запаси вологи на кінець вегетації – 0,75 НВ.

Активні запаси вологи, які можуть використовуватись рослинами в даному випадку складуть  $\Delta W = 327 - 0,75 \cdot 327 = 81,8$  мм або 818 м<sup>3</sup>/га.

Коефіцієнт використання атмосферних опадів для просапних культур в середньому за вегетацію складе 0,7.

Ефективні атмосферні опади складуть  $\mu P = 135,1$  мм або 1351 м<sup>3</sup>/га.

Тоді, за формулою О.М. Костякова (7.2) зрошувальна норма буде дорівнювати

$$M = 4200 - 1351 - 818 = 2031 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Як правило, зрошувальну норму округлюють з точністю до 50 м<sup>3</sup>/га, тоді приймають для реалізації поливів зрошувальну норму для кукурудзи на зерно 2000 м<sup>3</sup>/га.

## 7.2. Поливна норма

Поливна норма – об’єм води, що необхідно подати на гектар зрошуваної площі за один полив. Як і зрошувальну норму, її вимірюють в м<sup>3</sup>/га або мм шару води. Вона залежить від виду культури та фази її розвитку, потужності кореневмісного шару, водно-фізичних властивостей ґрунту, вмісту солей в ґрунті, кліматичних і гідрогеологічних умов, способу та техніки поливу.

Існує декілька підходів до встановлення поливної норми.

**Максимальну поливну норму** можна обчислити за формулою О.М. Костякова

$$m_{max} = W_{HB} - W_{min}, \quad (7.3)$$

$$m_{max} = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot (\beta_{HB} - \beta_{min}), \quad (7.4)$$

де  $m_{max}$  – максимальна поливна норма, м<sup>3</sup>/га;

$W_{HB}$  та  $W_{min}$  – запаси ґрунтової вологи при НВ та при перед поливній (мінімальній) вологості в кореневмісному шарі ґрунту, м<sup>3</sup>/га;

$\gamma$  – щільність кореневмісного шару ґрунту, г/см<sup>3</sup> або т/м<sup>3</sup>;

$h$  – глибина активного шару ґрунту, м;

$\beta_{HB}$  та  $\beta_{min}$  – вологість розрахункового шару ґрунту при НВ та перед поливній вологості, % від абсолютно сухого ґрунту.

Розрахунковий шар ґрунту ( $h$ ) визначається глибиною розвитку основної маси коріння, а отже, фазою його розвитку, рівнем агротехніки та іншими умовами.

Прийнято вважати, що при перед поливній вологості в кореневмісному шарі ґрунту необхідно доводити вологість до рівня, який відповідає НВ, тобто до тієї кількості вологи, що може утримати даний шар ґрунту. При подачі більшої кількості води, надлишки її профільнуються в більш глибокі шари ґрунту. Завищення цієї поливної норми призводить до виносу елементів живлення рослин за кореневмісний шар ґрунту, підняття рівня ґрунтових вод, заболоченню та засоленню ґрунту, зниженню врожайності сільськогосподарських культур. Для кожної рослини існує своя мінімально допустима межа вологості  $\beta_{min}$ , при пониженні якої рослини перестають нарощувати продуктивну масу та формувати врожай. Мінімальна межа вологості за-

лежить від рослини, її біологічної природи, періоду вегетації, вмісту солей в ґрунті, типу та виду ґрунтів.

В практиці зрошення перед поливну вологість приймають, як правило, для вологолюбних культур (овочі, зернові, кормові) 75–85 %, для менш вимогливих до вологи (технічні, масляничні) – 70–75 % від НВ.

На засолених землях перед поливну межу зволоження збільшують на 5–10 %, особливо для рослин, на розвиток яких солі в ґрунті найбільш негативно впливають (овочі, бавовник, кормові культури та ін.).

Поливна норма залежить також від техніки та способу поливу. Так, при поверхневих поливах найменша поливна норма складає 400–600 м<sup>3</sup>/га, що обумовлено більш рівномірним зволоженням зрошуваного поля.

При дощуванні відбувається рівномірний розподіл води по полю, практично при будь-якій поливній нормі. Швидкість вбирання води в ґрунт при дощуванні значно менша, ніж при поверхнево-самопливному поливі, тому для недопускання поверхневого змиву ґрунту максимальні поливні норми не повинні перевищувати 500–600 м<sup>3</sup>/га.

#### **Приклад 7.2. Розрахунок максимальної поливної норми**

- сільськогосподарська культура – кукурудза на зерно (фаза розвитку – викидання волоті);
- глибина кореневмісного шару ґрунту – 0,8 м;
- середня щільність кореневмісного шару ґрунту – 1,32 г/см<sup>3</sup>;
- середня вологість кореневмісного шару ґрунту при НВ – 28,3 %;
- передполивна вологість – 0,80 НВ.

Попередньо необхідно визначити  $\beta_{min} = 0,80НВ = 0,8 \cdot 28,3 = 22,6\%$ .

Розрахунок необхідно здійснити за формулою (7.4)

$$m_{max} = 100 \cdot 1,32 \cdot 0,8 \cdot (28,3 - 22,6) = 602 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Отримане значення поливної норми потрібно, як і зрошувальної норми, округлити з точністю до 50 м<sup>3</sup>/га. В даному випадку це складає 600 м<sup>3</sup>/га.

Проведення поливів максимальною поливною нормою допускається тільки у випадках, коли тривалість поливу не перевищує 1 добу та її величина не більше 60 мм. На практиці поливи мають тривалість – 5–8 діб та більше. В цих випадках полив нормою  $m_{max}$  призводить до подачі на поле надлишкової води, або до висихання ґрунту нижче  $\beta_{min}$ , або на початку до першого, а в кінці до іншого порушення оптимального діапазону.

**Допустиму поливну норму**, що забезпечує підтримання вологості ґрунту в оптимальному діапазоні, розраховують за формулою:

$$m_{дон} = \frac{m_{max}}{1 + \frac{D}{m_{доб}}}, \quad (7.5)$$

де  $D$  – середньодобовий дефіцит водоспоживання культури під час проведення поливу, визначений за рівнянням (3.4), м<sup>3</sup>/га за добу;  
 $m_{доб}$  – середньодобова подача води на поле площею  $F$  (га), що поливається дощувальною машиною з робочою витратою  $Q_M$ , л/с:

$$m_{доб} = 86,4 \cdot \eta^{(сч)} \cdot \eta^{(сд)} \frac{Q_M}{F}, \quad (7.6)$$

де  $\eta^{(сч)}$ ,  $\eta^{(сд)}$  – коефіцієнти використання часу доби та втрат води під час поливу дощувальною технікою.

Показники  $Q_M$ ,  $\eta^{(сч)}$ ,  $\eta^{(сд)}$  деяких типів та модифікацій дощувальних машин наведені в табл. 7.1.

**Таблиця 7.1 – Приклад робочих характеристик дощувальних машин**

Тип та модифікація машини	$Q_M$ , л/с	$\rho$ , мм/хв	$\eta^{(сч)}$	$\eta^{(сд)}$	$F$ , га	КЗВ
ДДА-100МА	130	2,5/0,22	0,75	0,80	90	0,92
«Волжанка» ДКШ-64-800	64	0,27	0,75	0,90	40–60	0,97
«Дніпро» ДФ-120	120	0,30	0,81	0,90	80–90	0,97
«Фрегат» ДМУ-Б363-90	90	0,25	0,96	0,90	75	0,83
«Фрегат» ДМУ-А337-65	65	0,24	0,96	0,90	41	0,83
ЭДМФ «Кубань-М»	180	1,1	0,90	0,90	120–140	0,97
ЭДМФ «Кубань-Л»	70	0,25	0,95	0,90	73	0,83

**Умовні позначення**  $Q_M$  – робоча витрата, л/с;  $\rho$  – інтенсивність дощу, мм/хв.,  $\eta^{(сч)}$  – коефіцієнт використання часу доби;  $\eta^{(сд)}$  – коефіцієнт використання води при поливі;  $F$  – площа, га; КЗВ – коефіцієнт земельного використання.

Коефіцієнти використання води в процесі поливу  $\eta^{(сд)}$  залежать від тривалості робочого часу машини. Так, для більшості дощувальних машин при цілодобовій тривалості він складає 0,90, а при роботі тільки в денні часи – 0,85.

Розраховані за формулами (7.4) і (7.6) допустимі поливні норми (нетто)  $m_{дон}$ , залежно від факторів, що на них впливають, на 25–40 і навіть на 60 % менші максимальних  $m_{max}$ .

### Приклад 7.3. Розрахунок допустимої поливної норми

- сільськогосподарська культура – кукурудза на зерно (фаза розвитку – викидання волоті);
- максимальна поливна норма – 750 м<sup>3</sup>/га;
- середньодобовий дефіцит водоспоживання кукурудзи розрахований балансовим методом – 35 м<sup>3</sup>/га/добу;
- витрата води дощувальною машиною – 90 л/с;
- зрошувана площа ділянки – 90 га;
- полив здійснюється дощувальною машиною колової дії «Фрегат».

Коефіцієнти використання часу та втрат води під час проведення поливу дощувальною технікою у відповідності за табл. 7.1 дорівнюють  $\eta^{(64)}=0,96$ ,  $\eta^{(60)}=0,90$ .

Середньодобова подача води на поле відповідно до формули (7.6) складе

$$m_{\text{доб}} = 86,4 \cdot 0,96 \cdot 0,90 \frac{90}{90} = 74,6 \text{ м}^3/\text{га}/\text{добу}.$$

Допустима поливна норма за формулою (7.5) складе

$$m_{\text{дон}} = \frac{750}{1 + \frac{35}{74,6}} = 510 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Допустима поливна норма на 32 % менше максимальної.

При зрошенні дощуванням у зв'язку зі зменшенням швидкості вбирання води в ґрунт може настати такий момент, коли інтенсивність дощу перевищить інтенсивність вбирання води в ґрунт. На поверхні ґрунту почнуть утворюватися калюжі, які з часом почнуть стікати, що може призвести до поверхневого стоку і ерозії ґрунту. При цьому виникнуть негативні явища, пов'язані з втратами поливної води і змивом верхнього гумусового, найбільш родючого, шару ґрунту. Для запобігання таких наслідків вводять поняття **достокової поливної норми**, тобто норми при якій може виникнути поверхневий стік.

Достокову поливну норму, при зрошенні дощуванням, орієнтовно можна розрахувати за формулою М.С. Єрхова

$$m_{\text{дос}} = \frac{k_v}{\sqrt{\rho e} \cdot 0,5d}, \quad (7.7)$$

де  $\rho$  – середня інтенсивність штучного дощу, мм/хв.;

$d$  – середній діаметр крапель дощу, мм;

$k_v$  – показник, що залежить від вбирної здатності ґрунту, мм (табл. 7.2).

Для різних дощувальних машин на важких суглинках достокова поливна норма наведена в табл. 7.3.

**Таблиця 7.2 – Показник  $k_v$ , мм**

Проникність ґрунту	$k_v$ , мм
Слабка та дуже слабка	Менше 30
Середня	30-60
Добра	60-90
Сильна та дуже сильна	Більше 90

**Таблиця 7.3 – Достоківа поливна норма для різних дощувальних машин, що працюють на важких за гранулометричним складом ґрунтах**

Марка машини, режим роботи	Достоківа поливна норма, м <sup>3</sup> /га
«Кубань»	390
ДДА-100МА, насадки доверху, довжина б'єфу 400 м	300
ДДА-100МА, насадки донизу, довжина б'єфу 400 м	150
«Фрегат» без врахування кутів	380
«Дніпро» з врахуванням кутів	300
«Волжанка»	525
Шлейф Метельського ДШ-20/600	520
КСИД-10	340
ДДН-70	120
ДДН-100	115

При розрахунках режимів зрошення визначають  $m_{\max}$ ,  $m_{\text{дон}}$  та  $m_{\text{доп}}$ , і в подальших розрахунках приймають менше значення.

Допустиму поливну норму (брутто) встановлюють з врахуванням коефіцієнтів втрат води під час поливу:

$$m_{\text{брт}} = m \cdot \beta, \quad (7.8)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує втрати води при поливі, залежить від способу поливу, технічних засобів і погоди під час поливу (Доценко В.І. та ін., 2014).

В середньому для зрошуваної зони України при зрошенні середньо струминними дощувальними машинами втрати води на випаровування з дощової хмари, рослин і ґрунту складають 10 %. Вночі ця величина дещо менша, а в денну пору більша, тому для розрахунків, в більшості випадків,  $\beta = 1,1$ .

Однак, при роботі деяких дощувальних машин, особливо, що працюють в русі, є мінімальна поливна норма, що обумовлена їх технічними характеристиками, які залежать від максимальної швидкості руху машини. Тому, якщо за розрахунками отримана поливна норма менше цієї норми, то необхідно або замінити дощувальну машину, або, все ж таки, прийняти  $m_{\text{роз}} = m_{\text{мін}}$ .

#### Приклад 7.4. Розрахунок достокової поливної норми

- середня вбираюча здатність ґрунту –  $k_v = 45$  мм;
- середня інтенсивність штучного дощу –  $0,27$  мм/хв.
- середній діаметр крапель дощу –  $1$  мм.

У відповідності до формули М.С. Єрхова достокова поливна норма складе

$$m_{\text{дос}} = \frac{30}{\sqrt{0,27e^{0,5 \cdot 1}}} = 35 \text{ мм або } 350 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Із всіх розрахованих поливних норм достокова – найменша, тому для реалізації поливної норми прийнята саме ця норма. Поливна норма брутто складе  $m_{\text{брт}} = 350 \cdot 1,1 = 385 \text{ м}^3/\text{га}$ .

На основі багаторічних досліджень на зрошувальних системах України були встановлені гранично допустимі значення оптимальних екологічно безпечних поливних норм відповідно до гранулометричного складу ґрунту та інтенсивності водоспоживання за добу сільськогосподарською культурою (табл. 7.4).

**Таблиця 7.4 – Гранично допустимі значення оптимальних екологічно безпечних поливних норм (м<sup>3</sup>/га) відповідно до гранулометричного складу ґрунту та інтенсивності водоспоживання за добу сільськогосподарських культур**

Потужність активного шару ґрунту, м	Гранулометричний склад ґрунту							
	глини, важкі суглинки		середні суглинки			легкі суглинки та супіски		
	добова інтенсивність водоспоживання $E$ , мм							
	менше 3	більше 3	менше 2	2–4	більше 4	менше 2	2–4	більше 4
0,3	200	300	200	300	300	200	200	250
0,5	300	400	300	300	400	200	300	300
0,7	400	500	300	400	450	300	350	400
0,9	500	600	400	500	500	400	400	450
1,0	550	650	400	500	550	400	450	500

#### Питання для самоконтролю

1. Що називають зрошувальною нормою?
2. Які одиниці виміру зрошувальної норми?
3. Що називають поливною нормою?
4. Який зв'язок між поливною і зрошувальною нормою?
5. Які передумови розрахунку максимальної поливної норми?
6. Чому не рекомендується здійснювати полив максимальною поливною нормою і розраховують допустиму поливну норму?
7. Дайте визначення достокової поливної норми.
8. Охарактеризуйте достокову поливну норму і від чого вона залежить?
9. Чому розраховують поливну норму брутто? Від чого вона залежить?



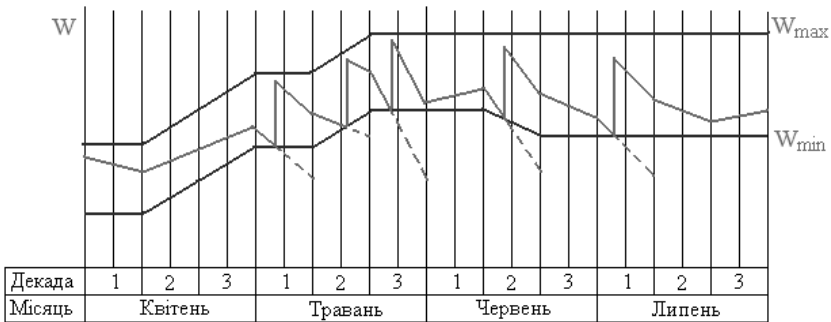
## 8. ПРИЗНАЧЕННЯ СТРОКІВ ПОЛИВІВ

У сучасній меліоративній практиці використовують декілька методів розрахунку поливного режиму (визначення строків поливу): *графоаналітичний; графічний; таблицний (аналітичний)*.

### 8.1. Графоаналітичний метод визначення строків поливу

Одним із найбільш розповсюджених методів визначення строків поливу є графоаналітичний метод О.М. Костякова. Він найбільш наглядний і теоретично обґрунтований, але потребує значних витрат часу на відображення графічної частини розрахунку.

В цьому методі розраховують мінімальний допустимий запас вологи в ґрунті ( $W_{\min}$ ) та максимальний запас вологи при НВ ( $W_{\max}$ ) для кожного періоду вегетації (декади), для кореневмісного шару ґрунту і будують графік їх зміни за вегетацію (рис. 8.1).



**Рисунок 8.1 – Розрахунок строків поливу графоаналітичним способом**

Так як для кожної фази вегетації змінюються глибина активного шару та допустима перед поливна вологість, то величини  $W_{\min}$  та  $W_{\max}$  змінюються також відповідно. Величини  $W_{\min}$  та  $W_{\max}$  розраховують за формулами

$$W_{\max} = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot \beta_{HB}, \quad (8.1)$$

$$W_{\min} = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot \beta_{\min}, \quad (8.2)$$

де  $h$  – глибина активного кореневмісного шару ґрунту, яка призначається для кожної декади залежно від фази розвитку культури.

На початку вегетації після сівби, мінімальну глибину прийма-

ють рівною потужності орного горизонту (0,3 м), в подальшому вона збільшується відповідно кожній культурі;

$\gamma$  – середня щільність кореневмісного активного шару ґрунту, г/см<sup>3</sup>;

$\beta_{HB}$  – середня вологість кореневмісного ґрунту відповідно при найменшій вологемості (HB);

$\beta_{\min}$  – середня вологість ґрунту при перед поливній межі (мінімальної межі оптимального зволоження). Вона залежить від глибини кореневмісного шару ґрунту і фази розвитку культури. Як правило, задається часткою від HB. В критичні періоди її приймають відповідною оптимальному значенню, а до нього і після – дещо менше (див. додаток А),

Визначивши фактичний запас води  $W_{\phi}$  за рівнянням водного балансу (3.5) при  $m=0$ , порівнюють його з  $W_{\min}$  та  $W_{\max}$  :

- якщо  $W_{\phi} > W_{\min}$ , то полив не потрібен в розрахункову декаду;
- якщо  $W_{\phi} < W_{\min}$ , необхідно проводити полив поливною нормою  $m$  і дата поливу призначається в точці перетину лінії  $W_{\phi}$  і  $W_{\min}$ ;
- якщо ж і після цього  $W_{\phi} < W_{\min}$ , то потрібно здійснити два поливи нормою  $m$ , і т. д. Як правило, для зрошуваної зони України більше двох поливів за декаду не проводять;
- якщо  $W_{\phi} > W_{\max}$ , що можливо в декади з рясними дощами, то  $W_{\phi}$  прирівнюють  $W_{\max}$ , а різницю ( $W_{\phi} - W_{\max}$ ) призначають на глибинний скид в розрахункову декаду.

Приклад розрахунку строків поливу графоаналітичним способом наведений у вправі 9.1.

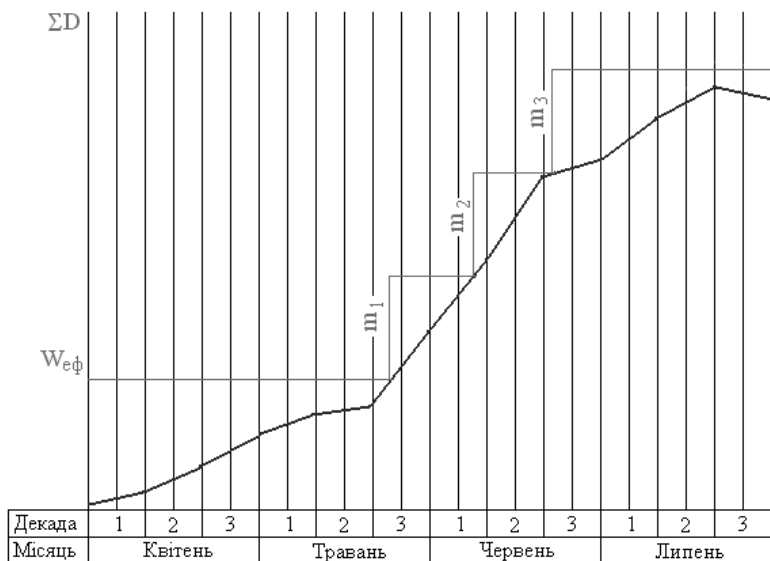
## 8.2. Графічний метод визначення строків поливу

Цей метод базується на використанні інтегральної кривої дефіцитів водоспоживання в розрахунковому шарі ґрунту. За визначеними раніше дефіцитами водоспоживання за формулою (3.4) за періодами вегетації (декадами) будують їх інтегральну криту (рис. 8.2).

Розраховують величину ефективних вологозапасів на початок вегетації за формулою

$$W_{e\phi} = 10\gamma \cdot h(\beta_{\text{поч}} - \beta_{\min}), \quad (8.3)$$

де  $\beta_{\text{поч}}$  – вологість ґрунту на початку вегетації, % від сухого ґрунту.



**Рисунок 8.2 – Визначення строків поливу за інтегральною кривою дефіцитів водоспоживання**

При відсутності відомостей про початкові запаси вологи можна прийняти такі значення: **для озимих культур і багаторічних трав** –  $\beta_{HB}$ ; **для ранніх ярових** –  $0,95\beta_{HB}$ ; **для пізніх ярових і овочевих культур** –  $0,90\beta_{HB}$ .

На графіку відкладають значення ефективних запасів вологи на початок вегетації ( $W_{ef}$ ) і з якого проводять горизонтальну лінію до перетину з інтегральною кривою. Точка перетину вказує на дату першого поливу.

Для визначення дат наступних поливів на інтегральній кривій необхідно відкласти вертикальні відрізки величиною, відповідно до поливної норми ( $m$ ). Горизонтальна лінія з кінця відрізка, проведена до інтегральної кривої вказує на дату наступного поливу. Побудову здійснюють до тих пір, доки останній полив не покриє дефіцит водоспоживання на останній фазі росту рослини.

Недоліком цього методу є неспроможність врахувати зміну глибини кореневмісного шару за фазами розвитку культури. Перевага цього методу полягає у відносній простоті і наочності, в порівнянні з іншими методами. Його широко застосовують при ручному розрахунку режимів зрошення для конкретної культури в конкретні роки.

Приклад розрахунку строків поливу графічним способом наведений у вправі 9.2.

### 8.3. Табличний спосіб визначення строків поливу

Цей метод ґрунтується на підборі строків поливу за рівнянням (3.5)

$$W_{\kappa} = W_n - E + P - (I + Y) + W_{2p} + m.$$

Спочатку  $W'_{\kappa}$  знаходять за умови  $m=0$  та  $(Y + I)=0$ . Далі якщо:  $W_{\min} < W'_{\kappa} < W_{HB}$ , то вважають, що поливати не потрібно та скидів немає;  $W'_{\kappa} > W_{HB}$ , тоді необхідно передбачати скид надлишку вологи  $(Y + I) = W'_{\kappa} - W_{HB}$ ,  $m=0$ ;  $W'_{\kappa} < W_{\min}$ , то необхідно призначити полив поливною нормою  $m$  і зробити перерахунок при цих умовах та визначити  $W''_{\kappa}$ ;  $W''_{\kappa} < W_{\min}$ , то необхідно призначити і другий полив з поливною нормою  $m$ , та знову зробити перерахунок, і т. д. до тих пір поки  $W_{\kappa} < W_{\min}$ .

Як правило, не рекомендують робити більше, ніж два поливи в декаду. Для зручності краще користуватися не загальними вологозапасами, а активними (легкодоступними), тобто  $W^a = W - W_{\min}$ .

Строки поливів визначають для декад де  $m \neq 0$ . Призначення дати першого поливу проводять за формулою

$$n_1 = \frac{W_n^a \cdot n}{D}, \quad (8.4)$$

де  $n_1$  – порядковий номер дня для першого поливу з початку декади;

$n$  – кількість днів декаді;

$W_n^a$  – корисний (активний) запас вологи на початок декади

$$W_n^a = W_n - W_{\min};$$

$D$  – дефіцит водоспоживання за розрахункову декаду.

Якщо за декаду необхідно провести два поливи, то день другого поливу знаходять за формулою

$$n_2 = \frac{(W_n^a + m_1) \cdot n}{D}, \quad (8.5)$$

де  $m_1$  – поливна норма першого поливу, м<sup>3</sup>/га;

Отримані за цими методами строки вказують на середні дати поливів. Щоб встановити дати початку та кінця поливу, визначають тривалість поливу, яка залежить від організації та технології поливу

на зрошуваному полі. Приклад розрахунку строків поливу за цим методом наведений у вправі 9.3 і 9.4.

***Питання для самоконтролю***

- 1. Які методи розрахунку строків поливів застосовують в сучасних умовах?*
- 2. В чому сутність розрахунку строків поливу графоаналітичним способом?*
- 3. За яких умов призначають строки поливу?*
- 4. Коли може виникнути глибинний скид атмосферних опадів при розрахунку строків поливу графоаналітичним методом?*
- 5. Що показує інтегральна крива дефіцитів водоспоживання сільськогосподарських культур?*
- 6. Як призначають полив сільськогосподарської культури графічним способом?*
- 7. В чому сутність призначення поливів табличним способом? За яких умов призначають поливи для поточної декади?*
- 8. Як розраховують день декади в якій потрібно проводити полив табличним способом?*

## 9. ПРАКТИКУМ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ

У цьому розділі розглянуті приклади розрахунку режимів зрошення найбільш розповсюдженими в Україні методами. Для розрахунку режимів зрошення необхідні вихідні дані за:

- метеорологічними величинами (погодними даними);
- сільськогосподарською культурою і її особливостями;
- ґрунтовими умовами;
- технікою поливу.

- Дано:** 1. Сільськогосподарська культура – кукурудза на зерно.  
 2. Проектна врожайність – 80 ц/га  
 3. Найближча гідрометеорологічна станція – Синельникове.  
 4. Метеорологічні умови за 2019 р. (табл. 1).

*Таблиця 9.1 – Метеорологічні дані за 2019 р.*

Декада	Місяць											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Атмосферні опади, мм												
1	17	0,9	3	0	23	35	50	73	13	49	0,3	10
2	12	3	5	29	1	0,6	6	0	4	0	16	23
3	30	1	19	15	13	4	37	0	7	20	23	40
Температура повітря												
1	-4,2	0,2	4,0	9,5	14,9	23,4	20,9	18,5	20,8	11,0	4,8	-1,4
2	-2,9	1,0	3,9	9,4	19,0	25,2	19,4	21,6	16,0	13,7	0,4	-1,7
3	-3,2	-1,8	4,7	13,8	20,0	23,1	22,2	22,4	11,5	9,7	-3,3	-1,8
Дефіцит вологості повітря												
1	0,5	0,7	3	7	6	14	12	9	14	4	2	1,1
2	0,6	1,1	3	4	10	18	10	12	10	8	1	1,2
3	0,7	1,5	3	8	10	17	11	15	6	3	1	1,3
Кількість днів з атмосферними опадами більше 1 мм												
1	2	0	0	0	2	4	5	4	1	3	0	2
2	2	0	1	4	0	0	2	0	1	0	2	3
3	4	0	3	3	1	1	3	0	1	2	2	4

5. Ґрунт – чорнозем звичайний середньопотужний малогумусний середньосуглинистий. Водно-фізичні властивості наведені в табл. 9.2.  
 6. Показник, який характеризує вбирну здатність ґрунту – 40 мм (середня вбирна здатність ґрунту).

**Таблиця 9.2 – Водно-фізичні властивості ґрунту**

Глибина, см	Щільність ґрунту, г/см <sup>3</sup>	Вологість ґрунту при НВ, %
0-10	1,15	28,6
10-20	1,18	25,7
20-30	1,27	24,2
30-40	1,28	25,4
40-50	1,32	22,4
50-60	1,38	22,0
60-70	1,36	21,7
70-80	1,37	21,6
80-90	1,40	21,7
90-100	1,42	21,4

7. Глибина залягання ґрунтових вод – 10 м.
8. Полив планується дощувальною машиною ДМУ-Б488-90.
9. Мінімальна поливна норма за один оберт дощувальної машини (при максимальній швидкості руху машини) – 216 м<sup>3</sup>/га.
10. Зрошувана площа 82,6 га.
11. Поливи здійснюють цілодобово.
12. Досточкова поливна норма прийнята – 30 м<sup>3</sup>/га.

## **Вправа 9.1. Розрахунок режиму зрошення методом О.М. Костякова**

- Необхідно:**
1. Розрахувати сумарне водоспоживання в різні періоди росту і розвитку сільськогосподарської культури за методом О.М. Костякова.
  2. Розрахувати і побудувати криві граничних запасів вологи в кореневмісному шарі ґрунту.
  3. Розрахувати строки поливів графоаналітичним способом.
  4. Визначити зрошувальну норму.

### **Розв'язання:**

Розрахунок режиму зрошення сільськогосподарських культур графоаналітичним методом виконують в такій послідовності (табл. 9.3 та рис. 9.1):

1. Перш за все необхідно встановити строки вегетації вибраної культури. Для попередніх розрахунків можна прийняти початок вегетації дату переходу через певну температуру, °С:
  - пшениця озима, люцерна – +5 °С;
  - буряки кормові і цукрові – +7 °С;
  - кукурудза – +12 °С;
  - ранні ярі культури – +5 °С;
  - пізні ярі культури – +10 °С;
  - більшість овочевих культур – +10 °С.

У даному випадку при вирощуванні кукурудзи на зерно початок вегета-

ції необхідно приурочити до дати переходу середньодобової температури повітря через +12 °С, що відповідно до завдання, відповідає першій декаді травня. Отже, всі розрахунки необхідно розпочинати з першої декади травня. Тривалість вегетації для кукурудзи на зерно триває приблизно 14 декад (додаток Б). Отже, строки вегетації, відповідно до додатку Б за погодними умовами конкретного року необхідно скорегувати і встановити з 1 травня до 10 вересня.

2. Атмосферні опади ( $P$ , мм) отримуємо за вихідними даними (дані спостережень за найближчої метеостанції).
3. Коефіцієнт використання опадів ( $\mu$ ) приймають для ширококорядних посівів просапних культур (кукурудзи, цукрових буряків, овочів, бавовнику, плодкових, ягідних насаджень та ін.) рівним 0,7 та для вузькорядних культур (зернових колосових, однорічних та багаторічних трав та ін.) – 0,6. В даному випадку для кукурудзи приймаємо 0,7 протягом всієї вегетації.
4. Ефективні атмосферні опади ( $P_{ef}$ , м<sup>3</sup>/га) визначають як добуток  $10\mu P$ .
5. Водоспоживання за декадами, у % від сумарного випаровування за вегетацію ( $n$ ) орієнтовно для півдня України можна прийняти за додатком Б. При цьому необхідно скорегувати значення для декад у відповідності до погодних умов конкретного року.
6. Сумарне випаровування за вегетаційний період сільськогосподарської культури згідно формули О.М. Костякова

$$E = K_B \cdot V, \quad (9.1)$$

де  $K_B$  – коефіцієнт водоспоживання, м<sup>3</sup>/ц;

$V$  – планова урожайність сільськогосподарської культури, ц/га.

Значення  $K_B$  і  $V$  для основних сільськогосподарських культур, що вирощують на зрошуваних землях Степової зони України можна прийняти за табл. 4.1.

Згідно табл. 4.1 для даного випадку  $V=80$  ц/га та  $K_B=65$  м<sup>3</sup>/ц, тому  $E=80 \cdot 65=5200$  м<sup>3</sup>/га.

7. Для визначення сумарного випаровування за декаду ( $E_{дек}$ ) необхідно сумарне випаровування за вегетацію розподілити відповідно до його відсоткового розподілу ( $n$ ).
8. Потужність активного шару ґрунту до кінця розрахункової декади ( $h$ , м) приймають або за фенологічними фазами розвитку сільськогосподарських культур (додаток А), або орієнтовно для півдня України подекадно за додатком Б для відповідних декад.
9. Вологість ґрунту, що відповідає найменшій вологоємності ( $\beta_{НВ}$ , %) визначають для активного шару ґрунту, як середнє пересічне з воднофізичних властивостей ґрунту, які наведені у вихідних даних (див. табл. 9.2).
10. Вологість ґрунту, що відповідає допустимій межі висушування ( $\beta_{min}$ , %) визначають для активного шару ґрунту, як частку від НВ відповідно з додатком А.



Таблица 9.3 – Розрахунок режиму зрощення кукурудзи на зерно графоаналітичним методом О.М. Костякова за даними метеостанції Синельників в 2019 р.

№ з/п	Показник	Вегетаційний період												Сума				
		Квітень			Травень			Червень			Липень				Серпень			Вересень
		3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		3	1	2	
1	$P, \text{ мм}$	15	23	1	13	35	0,6	4	50	6	37	73	0	0	13	276		
2	$\mu$	0,7																
3	$P_{\text{эф}}$	105	161	7	91	245	4,2	28	350	42	259	511	0	0	91	1929		
4	$n, \%$	4,5	5,0	5,5	6,0	7,0	7,5	7,5	8,5	9,0	9,0	9,0	8,5	8,0	7,5	6,5	100	
5	$E, \text{ м}^3/\text{га}$	234	260	286	312	364	390	390	442	468	468	442	416	390	338	5200		
6	$h, \text{ м}$	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
7	$\beta_{\text{авг}}, \%$	25,4	25,4	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	23,9	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2		
8	$\beta_{\text{лип}}, \%$	19,0	19,0	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	19,4	19,4	19,1	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4		
9	$\gamma, \text{ г}/\text{см}^3$	1,22	1,22	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,27	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31		
10	$W_{\text{макс}}, \text{ м}^3/\text{га}$	1240	1240	1837	1837	1837	1837	1837	1837	2125	3039	3039	3039	3039	3039	3039		
11	$W_{\text{мін}}, \text{ м}^3/\text{га}$	927	927	1376	1376	1376	1376	1376	1467	1725	2502	2279	2279	2279	2279	2279		
12	$\Delta W, \text{ м}$			0,2						0,1	0,3							
13	$\Delta W, \text{ м}^3/\text{га}$			598						288	914					1800		
14	$h_{\text{зр}}, \text{ м}$	10																
15	$K_{\text{зр}}$	1,00																
16	$D, \text{ м}^3/\text{га}$	129	99	-319	221	119	386	362	92	138	-705	-69	416	390	247	1471		
17	$W, \text{ м}^3/\text{га}$	1118	989	1140	1459	1474	1535	1505	1384	1592	1750	2756	2825	2409	2319	2372		
18	$m, \text{ м}^3/\text{га}$		250		236	300	236	241	300	297	300			300	300	2760		
19	$C, \text{ м}^3/\text{га}$																	

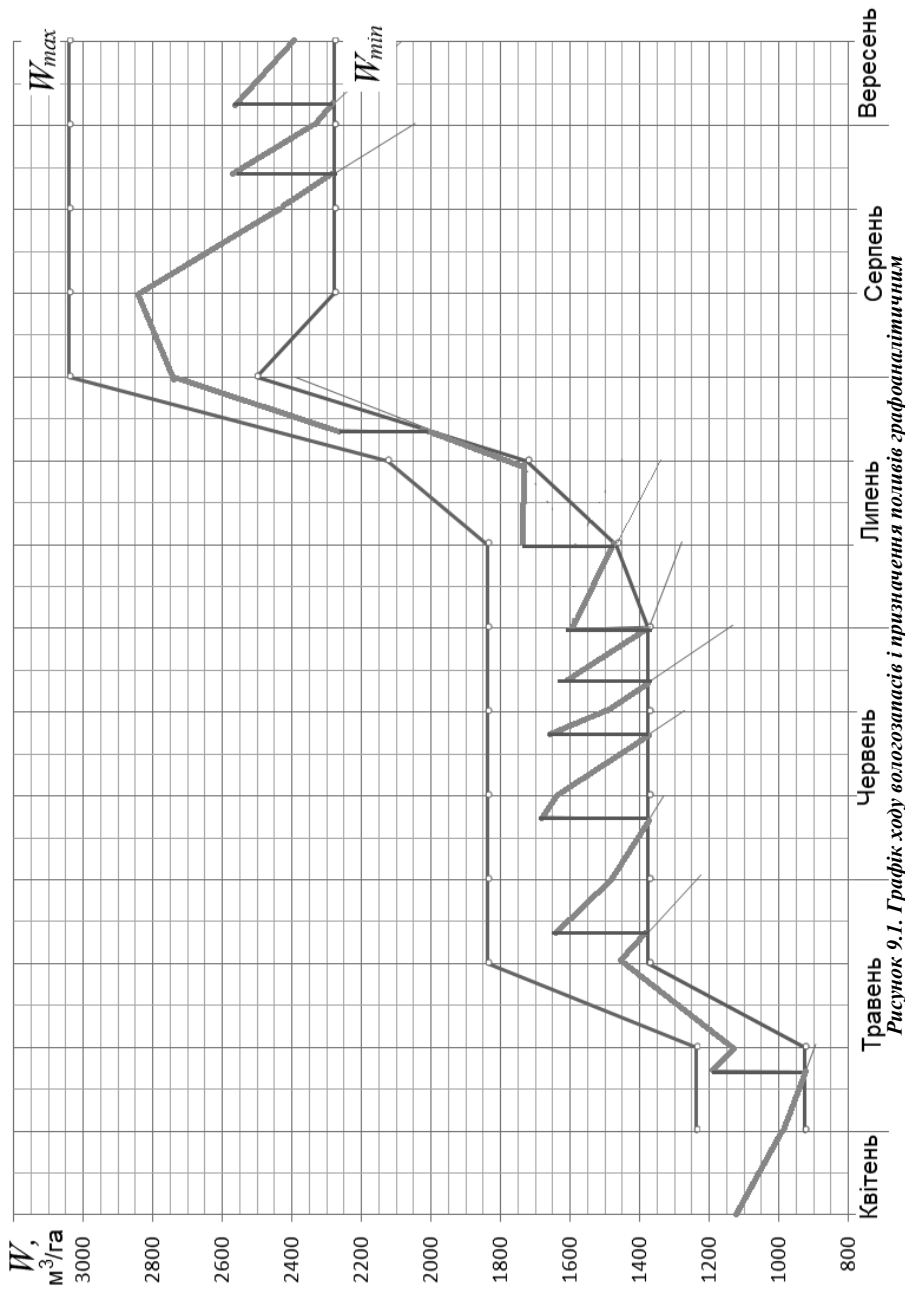


Рисунок 9.1. Графік ходу вологозапасів і призначення поливів агрофітотичним

11. Щільність розрахункового шару ґрунту ( $\gamma$ , т/м<sup>3</sup> або г/см<sup>3</sup>) визначають як середнє пересічне значення для даного шару із водно-фізичних властивостей (див. табл. 9.2).

12. Максимальну кількість запасів вологи в розрахунковому шарі ґрунту при найменшій вологоємкості на кінець розглянутої декади визначають за формулою

$$W_{\max} = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot \beta_{HB}. \quad (9.2)$$

13. Мінімальну кількість запасів вологи в цьому ж шарі ґрунту визначають за формулою

$$W_{\min} = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot \beta_{\min}. \quad (9.3)$$

14. За даними значень  $W_{\max}$  та  $W_{\min}$  на графіку будують криві, які їм відповідають (див. рис. 9.1).

15. Приріст активного шару ґрунту ( $\Delta h$ , м) розраховують тільки для тих декад, в яких змінюється потужність активного шару ґрунту  $\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$ .

16. Приплив вологи від збільшення активного шару ґрунту ( $V_{дек}$ , м<sup>3</sup>/га) визначають також тільки для тих декад, в яких є приріст цього шару.  $V_{дек}$  визначають за умови, що вологість ґрунту в нижче розташованих шарах знаходиться при найменшій вологоємкості, тому її можна визначити як різницю  $W_{\max}$  за двома суміжними декадами.

17. Глибину залягання ґрунтових вод ( $h_{зр}$ , м) приймають за вихідними даними.

18. Коефіцієнт використання ґрунтових вод ( $K_{зр}$ ) визначають відповідно до  $h_{зр}$  залежно від гранулометричного складу ґрунту і розповсюдження кореневої системи. Так як глибина залягання рівня ґрунтових вод більше 4 м, то їх вплив буде відсутній, тому для всіх випадків  $K_{зр} = 1$ .

19. Сумарне випаровування з урахуванням підживлення ґрунтових вод визначають як добуток  $K_{зр} \cdot E$ .

20. Дефіцит водоспоживання сільськогосподарської культури за декаду ( $D$ , м<sup>3</sup>/га) визначають балансовим методом за формулою

$$D = K_{зр} \cdot E - P_{эф} - V_{дек}. \quad (9.4)$$

21. Поточні вологозапаси ( $W_{дек}$ , м<sup>3</sup>/га) визначають на початок і кінець кожної декади. На початок першої декади вегетації запаси вологи отримують для кореневмісного шару за формулою

$$W_n = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot \beta_n, \quad (9.5)$$

де  $\beta_n$  – вологість ґрунту на початок вегетації.

За відсутності інформації про вологість ґрунту на початок вегетації можна прийняти орієнтовно такі значення:

- для озимих культур та багаторічних трав – НВ;
- для ранніх ярових культур – 0,95 НВ;
- для пізніх ярових та овочевих – 0,9 НВ.

В даному випадку для кукурудзи можна прийняти

$$\beta_n = 0,9\beta_{HB} = 0,9 \cdot 25,4 = 22,9 \%$$

Тоді  $W_n = 100 \cdot 1,22 \cdot 0,4 \cdot 22,9 = 1118 \text{ м}^3/\text{га}$ .

22. На подальші декади запаси вологи визначають як різницю між початковими (на початок поточної декади) та дефіцитом водоспоживання, тобто  $W_k = W_n - D$ . При цьому необхідно враховувати знак, що отриманий для дефіциту водоспоживання. Якщо дефіцит водоспоживання за декаду буде менше 0, то його необхідно не віднімати, а додавати. Отримані вологозапаси відкладають на графіку (рис. 4.1). Якщо при цьому отримані вологозапаси на кінець декади будуть виходити за межі  $W_{\min}$  або  $W_{\max}$ , необхідно передбачити в цю декаду полив або глибинний скид, і зробити перерахунок.

23. У разі виходу отриманої кривої  $W_{дек}$  за межу  $W_{\min}$ , визначають точку їх перетину і в цей час призначають полив, який записують до табл. 9.4 в графу поливи ( $m$ ,  $\text{м}^3/\text{га}$ ). Величину цього поливу можна знайти як різницю  $W_{\max} - W_{\min}$  і її порівнюють з достовірною поливною нормою.

У даному випадку **перший полив** необхідно провести вже 6.05, (тобто перша декада травня). Максимальна поливна норма для цього періоду складе

$$m_{\max} = W_{\max} - W_{\min} = 1240 - 927 = 313 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Для запобігання переполивів необхідно враховувати технологію проведення поливів. Так, при застосуванні дощувальних машин полив на одному полі здійснюють декілька діб.

Середньодобову подачу води на поле площею 82,6 га, що поливається дощувальною машиною «Фрегат» з витратою 90 л/с розраховують за формулою (7.6).

Показники  $Q_m$ ,  $\eta^{(ep)}$ ,  $\eta^{(ed)}$  деяких типів та модифікацій дощувальних машин наведені в табл. 7.1.

$$\text{Тоді } m_{дод} = \frac{3,6 \cdot 16 \cdot 0,75 \cdot 90}{82,6 \cdot 1,18} = 39,9 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Допустима поливна норма, що забезпечує підтримання вологості ґрунту в оптимальному діапазоні, розраховується за формулою (7.5)

$$m_{дон} = \frac{313}{1 + \frac{9,9}{39,9}} = 250 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Отриману поливну норму порівнюють з достовірною. В даному випадку, допустима поливна норма менша, тому вона і прийнята. Отже, необхідно провести полив з поливною нормою 250  $\text{м}^3/\text{га}$ .

Вологозапаси на кінець декади перераховують з урахуванням цього поливу, тобто  $W_k = W_n - D + m$ .

Якщо перераховані вологозапаси все ж таки будуть менші, ніж  $W_{\min}$ , необхідно призначити ще один полив і, тоді, вологозапаси на кінець декади будуть розраховуватись за формулою

$$W_k = W_n - D + m_1,$$

де  $m_1$  – величина першого поливу в цю декаду.

У разі, якщо вологозапаси на кінець декади будуть більші за  $W_{\max}$ , то їх прирівнюють до  $W_{\max}$ , а різницю між розрахованими вологозапасами ( $W_{\max} - W_{дек}$ ) записують в рядок скиди ( $C$ , м<sup>3</sup>/га).

Тривалість поливу визначають за формулою

$$t_{пол} = \frac{m_{дон}}{m_{доб}}, \text{ дїб.} \quad (9.6)$$

$$\text{Тривалість першого поливу } t_{пол} = \frac{250}{39,9} = 6,3 \text{ дїб (6).}$$

Розпочати полив необхідно 1.05, а закінчити 7.05.

**Другий полив** 24.05 (третя декада травня)

$$m_{max} = 1837 - 1376 = 461 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{дон} = \frac{461}{1 + \frac{22,1}{39,9}} = 297 \text{ м}^3/\text{га},$$

$$t_{пол} = \frac{297}{39,9} = 7,4 \text{ доби (7).}$$

Прийнята поливна норма 236 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 7 дїб. Початок поливу – 20.05.

**Третій полив** 7.06 (перша декада червня)

$$m_{max} = 1837 - 1376 = 461 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{дон} = \frac{461}{1 + \frac{11,9}{39,9}} = 355 \text{ м}^3/\text{га},$$

$$t_{пол} = \frac{300}{39,9} = 7,5 \text{ доби (8)}$$

Розрахована допустима поливна норма 355 м<sup>3</sup>/га, є більшою достокової, тому прийнята достокова поливна норма 300 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 7,5 дїб. Початок поливу – 30.05.

**Четвертий полив** 18.06 (друга декада червня)

$$m_{max} = 1837 - 1376 = 461 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{дон} = \frac{461}{1 + \frac{38,6}{39,9}} = 234 \text{ м}^3/\text{га},$$

$$t_{пол} = \frac{234}{39,9} = 5,9 \text{ доби (6)}$$

Прийнята аналогічна поливна норма 236 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 5,9 дїб (6). Початок поливу – 13.06.

**П'ятий полив** 25.06 (третя декада червня)

$$m_{\max} = 1837 - 1376 = 461 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{\text{дон}} = \frac{461}{1 + \frac{36,2}{39,9}} = 241 \text{ м}^3/\text{га},$$

$$t_{\text{пол}} = \frac{241}{39,9} = 6,1 \text{ доби (6)}.$$

Прийнята поливна норма 241 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 6,1 діб. Початок поливу – 20.06.

**Шостий полив** 1.07 (друга декада липня)

$$m_{\max} = 1837 - 1467 = 370 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{\text{дон}} = \frac{370}{1 + \frac{9,2}{39,9}} = 300 \text{ м}^3/\text{га},$$

$$t_{\text{пол}} = \frac{300}{39,9} = 7,5 \text{ доби (8)}$$

Прийнята поливна норма 300 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 7,5 доби. Початок поливу – 24.06.

**Сьомий полив** 12.07 (друга декада липня).

$$m_{\max} = 2125 - 1725 = 400 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{\text{дон}} = \frac{400}{1 + \frac{13,8}{39,9}} = 297 \text{ м}^3/\text{га},$$

$$t_{\text{пол}} = \frac{297}{39,9} = 7,4 \text{ доби (7)}$$

Прийнята поливна норма 297 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 7,4 діб. Початок поливу – 6.07.

**Восьмий полив** 25.07 (третя декада липня)

$$m_{\max} = 3039 - 2502 = 537 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{\text{дон}} = \frac{537}{1 + \frac{20,9}{39,9}} = 352 \text{ м}^3/\text{га},$$

$$t_{\text{пол}} = \frac{300}{39,9} = 7,5 \text{ доби (8)}$$

Розрахункова допустима поливна норма перевищує достокову, тому прийнята достокова поливна норма 300 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 7,5 діб. Початок поливу – 18.07.

**Дев'ятий полив** 24.08 (третя декада серпня)

$$m_{\max} = 3039 - 2279 = 760 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{\text{дон}} = \frac{760}{1 + \frac{39,0}{39,9}} = 384 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Прийнята поливна норма 300 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 7,5 діб (8). Початок поливу – 17.08.

**Десятий полив** 4.09 (перша декада вересня)

$$m_{\max} = 3039 - 2279 = 760 \text{ м}^3/\text{га}, \quad m_{\text{дон}} = \frac{760}{1 + \frac{24,7}{39,9}} = 469 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Прийнята поливна норма – 300 м<sup>3</sup>/га. Тривалість поливу – 7,5. Початок поливу – 28.08.

Отже для задоволення потреб кукурудзи у волозі необхідно провести 10 поливів.

Зрошувальну норму можна визначити як суму всіх поливних норм, тобто  $M = \sum m$ . У наведеному прикладі вона складе  $M = 2760 \text{ м}^3/\text{га}$ .

Перевірку правильності проведених розрахунків можна провести за формулою

$$\sum D = \sum K_{\text{сп}} \cdot E - \sum \mu \cdot P - \sum V_{\text{дек}}$$

в нашому випадку

$$1471 = 5200 - 1929 - 1800 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Остаточний режим зрошення кукурудзи на зерно в 2009 р. за даними МС Синельникове наведений в табл. 9.4.

**Таблиця 9.4 – Режим зрошення кукурудзи на зерно в 2019 р. за даними метеостанції Синельникове**

№ поливу	Строки поливу			Поливна норма, м <sup>3</sup> /га
	початок	кінець	тривалість	
1	1.05	6.05	6,2 (6)	250
2	20.05	24.05	7,4 (7)	236
3	30.05	7.06	7,5 (8)	300
4	13.06	18.06	5,8 (6)	236
5	20.06	25.06	6,1 (6)	241
6	24.06	1.07	7,5 (8)	300
7	6.07	12.07	7,4 (7)	297
8	18.07	25.07	7,5 (8)	300
9	18.08	24.07	7,5 (8)	300
10	28.08	4.09	7,5 (8)	300

Зрошувальна норма – 2760 м<sup>3</sup>/га.

Мінімальний міжполивний період – 5 діб.

Проаналізувавши строки поливу і рекомендовану зволоженість ґрунту можна відмовитись від останніх поливів, так як вони будуть проходити у фази молочної і воскової стиглості. У ці фази урожай зерна вже сформований і зайва волога буде тільки шкодити якості врожаю. Таким чином, зрошувальна норма буде зменшена до 2160 м<sup>3</sup>/га.

## **Вправа 9.2. Розрахунок режиму зрошення біокліматичним методом А.М. та С.М. Алпатьєвих**

Дано: 1. Подекадні атмосферні опади (табл. 9.1).

2. Середньодекадні значення дефіцитів вологості повітря.

3. Середньодекадні значення температур повітря.
4. Глибина залягання ґрунтових вод – 10 м.
5. Водно-фізичні властивості ґрунту (табл.9.2).
6. Досточкова поливна норма – 30 мм.

Необхідно: 1. Розрахувати інтегральну криву дефіцитів водоспоживання за методом А.М. і С.М. Алпатьєвих.

2. Визначити строки поливів графічним способом.

#### Розв'язання

Розрахунок режиму зрошення сільськогосподарських культур біокліматичним методом Алпатьєвих виконують подекадно в такій послідовності (табл.9.5 та рис. 9.2)

- 1-3. Подекадно від дати посіву (для багаторічних трав та озимих культурах з дня відновлення вегетації, яка починається датою переходу середньодобових температур повітря через +5 °С весною) до кінця періоду водоспоживання, встановлюють за даними найближчої метеорологічної станції:  $d$  – середньодекадний дефіцит вологості повітря, мб;  $t$  – середньодекадну температуру повітря, °С;  $P$  – суми атмосферних опадів за декаду, мм. За кінець періоду водоспоживання необхідно приймати:
  - для зернових – настання фази воскової стиглості;
  - для буряків цукрових та кормових – час настання технічної стиглості;
  - для картоплі – початок в'янення бадилля;
  - для овочів – кінець масового збирання врожаю;
  - для багаторічних трав – припинення вегетації;
  - для кукурудзи на силос та зелений корм – збирання врожаю.
- 4,5. Розраховують суми за декадами середньодобових температур ( $\sum t = 10 \cdot t$ , °С) та дефіцитам вологості повітря ( $\sum d = 10 \cdot d$ , мб).
6. Визначають кількість атмосферних опадів, які надходять на поповнення вологозапасів (ефективні опади) аналогічно, як і в попередній вправі ( $\mu P$ , мм).
7. Поправочний коефіцієнт на приведення тривалості дня до 12-ти годин ( $b$ ) визначають за додатком В залежно від широти місцевості та розрахункової декади (географічна широта м. Дніпро 48°30').
8. Подекадно визначають суми середньодобових температур повітря з поправкою на приведення до 12-ти годинної тривалості дня, шляхом множення сум середньодобових температур на відповідний поправочний коефіцієнт  $b(\sum t$ , °С).
9. Знаходять суми середньодобових температур повітря з поправками на тривалість дня зростаючим підсумком від сходів (відновлення вегетації) до кінця водоспоживання  $\sum b \sum t$ , °С.

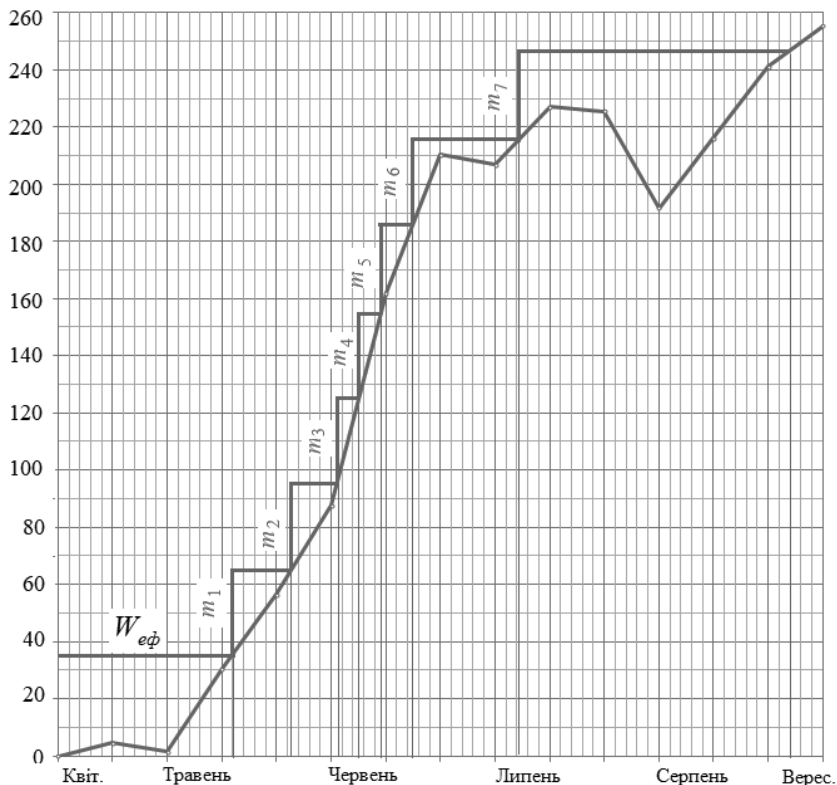


Таблица 9.5 – Розрахунок режиму зрошення кукурудзи на зерно біосільматичним методом А.М. і С.М. Алитських за даними метеостанції Синельників в 2019 р.

№ з/п	Показник	Вегетаційний період															
		Квіт.			Травень			Червень			Липень			Серпень			Верес.
		3	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	$P, \text{ мм}$	15,0	23,0	1,0	13,0	1,0	35,0	0,6	4,0	50,0	6,0	37,0	73,0	0,0	0,0	13,0	
2	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	13,8	14,9	19,0	20,0	23,4	25,2	23,1	20,9	19,4	22,2	18,5	21,6	22,4	20,8		
3	$d, \text{ мб}$	8,0	6,0	10,0	10,0	14,0	18,0	17,0	12,0	10,0	11,0	9,0	12,0	15,0	14,0		
4	$\sum d, \text{ мб}$	80	60	100	100	140	180	170	120	100	110	90	120	150	140		
5	$\sum t, \text{ }^\circ\text{C}$	138	149	190	200	234	252	231	209	194	222	185	216	224	208		
6	$\mu P, \text{ мм}$	10,5	16,1	0,7	9,1	24,5	0,4	2,8	35,0	4,2	25,9	51,1	0,0	0,0	9,1		
7	$B$	1,19	1,23	1,25	1,30	1,32	1,34	1,34	1,33	1,31	1,30	1,24	1,21	1,16	1,11		
8	$b \sum t, \text{ }^\circ\text{C}$	164	183	238	260	309	338	310	278	254	289	229	261	260	231		
9	$\sum b \sum t, \text{ }^\circ\text{C}$	164	347	585	845	1154	1492	1801	2079	2333	2622	2851	3113	3372	3603		
10	$k_6, \text{ мм/мб}$	0,19	0,23	0,31	0,39	0,45	0,47	0,34	0,32	0,30	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21		
11	$E, \text{ мм}$	15,2	13,8	31,0	39,0	63,0	84,6	57,8	38,4	30,0	29,7	22,5	27,6	33,0	29,4		
12	$g$	1	1	1	0,95	0,95	0,95	0,95	0,9	0,9	0,9	0,85	0,98	0,85	0,85		
13	$E_g, \text{ мм}$	15,2	13,8	31,0	37,1	59,9	80,4	54,9	34,6	27,0	26,7	19,1	27,0	28,1	25,0		
14	$k_{\text{в}}$	1,00	0,95	0,95	0,95	0,93	0,93	0,93	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,93		
15	$E_{\text{в}}, \text{ мм}$	15,2	13,1	29,5	35,2	55,7	74,7	51,1	31,4	24,6	24,3	17,2	24,3	25,2	23,2		
16	$k_{\text{зр}}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
17	$W_{\text{зр}}, \text{ мм}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
18	$D, \text{ мм}$	4,7	-3,0	28,8	26,1	31,2	74,3	48,3	-3,6	20,4	-1,6	-33,9	24,3	25,2	14,1		
19	$\sum D, \text{ мм}$	4,7	1,7	30,5	56,6	87,7	162,0	210,3	206,8	227,1	225,6	191,7	216,0	241,3	255,4		

10. Коефіцієнти біологічної кривої ( $k_b$ ), починаючи з періоду сходів для ярих та з періоду відновлення вегетації для багаторічних трав та озимих культур, визначають залежно від суми температур зростаючим підсумком за даними додатку Г. При цьому для ярих культур в період від сівби до сходів коефіцієнт біологічної кривої  $k_b$  з незатіненої рослини поверхні ґрунту приймають 0,15 мм/мб при опадах менших 5 мм та 0,19 мм/мб – при випадінні опадів більше ніж 5 мм. Період сівба-сходи враховується для всіх ярих культур – одна-дві декади.
11. Сумарне випаровування за декаду ( $E$ , мм) визначають за формулою (4.2) в залежності від  $\sum d$  та  $k_b$ .
12. Визначають коефіцієнт вологообміну з нижче розташованими шарами ґрунту ( $g$ ), який враховує капілярне підживлення та безпосереднє використання води корінням рослин із шарів, розташованих глибше розрахункового шару ґрунту.  
Для ярих культур весь період вегетації розділяють на чотири частини: в першу чверть  $g = 1,00$ ; в другу –  $g = 0,95$ ; в третю –  $g = 0,90$ ; в четверту –  $g = 0,85$ . Для озимих культур період вегетації ділять на три частини: в першу третину  $g = 0,95$ ; в другу –  $g = 0,90$ ; в третю –  $g = 0,85$ . Для багаторічних трав за весь вегетаційний період  $g = 0,85$ .
13. Сумарне випаровування з поправками на вологообмін ( $E_g$ , мм) визначають за формулою  $E_g = E \cdot g$ .
14. Мікрокліматичний коефіцієнт ( $k_m$ ), який враховує зміну погодних умов за рахунок зрошення визначають за табл. 4.2.
15. Сумарне випаровування з врахуванням мікрокліматичного коефіцієнта визначають за формулою  $E_m = E_g \cdot k_m$ .
16. Коефіцієнт капілярного підживлення близько розташованих ґрунтових вод визначають за табл. 6.5 залежно від їх глибини залягання, механічного складу ґрунту та агрофону. В даній вправі ґрунтові води залягають глибоко (10 м), тому участі в формуванні запасів вологи в розрахунковому кореневмісному шарі не беруть і прийнятий коефіцієнт  $k_{zp} = 0$ .
17. Визначають кількість використаних ґрунтових вод, якщо їх рівень залягання менше 3 м, за формулою  $W_{zp} = E_m \cdot k_{zp}$ . В даному випадку  $W_{zp} = 0$ .
18. Розраховують дефіцит водоспоживання за декадами з початку вегетації ( $D$ , мм) за формулою  $D = E_m - (\mu \cdot P + W_{zp})$ .
19. За  $D$  розраховують їх значення зростаючим підсумком ( $\sum D$ , мм), за якими будують інтегральну криву дефіциту водоспоживання (рис.9.2).

Подальші розрахунки строків поливів проводять графічним методом на рис.9.2. По осі абсцис ( $x$ ) відкладають час (місяці та декади), а по осі ординат ( $y$ ) – розраховані в табл.9.5 значення інтегральної кривої дефіциту водоспоживання (на кінець розрахункової декади).

$\Sigma E, \text{ мм}$ 

**Рисунок 9.2 – Інтегральна крива дефіцитів водоспоживання кукурудзи на зерно, розрахована за даними метеостанції Синельникове за 2019 р.**

Для визначення дати першого поливу на інтегральній кривій необхідно відкласти початкові ефективні вологозапаси ( $W_{eф}$ ), які розраховують за формулою

$$W = 10 \cdot h \cdot \gamma \cdot (\beta_n - \beta_{\min}), \quad (9.8)$$

де  $h$  – розрахунковий шар ґрунту, м, для кукурудзи за додатком А  $h = 0,8$  м;  
 $\gamma$  – щільність ґрунту розрахункового шару,  $\text{г/см}^3$  або  $\text{т/м}^3$ , за водно-фізичними властивостями (табл.9.2) для розрахункового шару  $\gamma = 1,26 \text{ г/см}^3$ ;  
 $\beta_n$  – початкова вологість ґрунту, %, для кукурудзи можна прийняти  $\beta_n = 0,9\beta_{НВ}$  (див.п.9.1), тобто  $\beta_n = 21,3\%$ ;  
 $\beta_{\min}$  – мінімально допустима вологість розрахункового шару ґрунту, необхідна для нормального росту та розвитку сільськогосподарських куль-

тур, %, для кукурудзи можна прийняти  $\beta_{\min} = 0,75\beta_{HB}$  (додаток А), тобто  $\beta_{\min} = 17,7\%$ .

Отже,  $W_{ef} = 10 \cdot 0,8 \cdot 1,26 \cdot (21,3 - 17,7) = 36,3$  мм.

Для визначення дати першого поливу на осі ординат ( $y$ ) від нуля відкладають початкові ефективні вологозапаси ( $W_{ef}$ ), потім із цієї ординати необхідно провести лінію, паралельну осі абсцис ( $x$ ) до перетину з інтегральною кривою дефіциту водоспоживання. Перпендикуляр, опущений із точки перетину на вісь абсцис, вказує на середню дату першого поливу.

Для визначення дати наступних поливів за ефективними вологозапасами на інтегральній кривій необхідно відкласти поливні норми, величину яких визначають залежно від зміни активного шару ґрунту за формулою О.М. Костякова (7.4), потім уточнену за формулою (7.5), або прийняту достоккову поливну норму за формулою (7.7), чи прийняту за табл. 7.4. Розрахункові поливні норми округляють з точністю до 5 мм або 50 м<sup>3</sup>/га.

Для визначення строків другого поливу на осі ординат ( $y$ ) від початкових вологозапасів необхідно відкласти поливну норму першого поливу, потім із цієї ординати проводять лінію, паралельну осі абсцис ( $x$ ) до перетину її з інтегральною кривою дефіциту водоспоживання. Перпендикуляр, опущений із точки перетину на осі абсцис, покаже дату другого поливу.

Побудову проводять до тих пір, доки останній полив не покриє дефіцит водоспоживання на останній фазі розвитку рослин.

В даній вправі у всіх випадках прийнята достоккова поливна норма рівна 30 мм.

Розраховані строки поливів і поливні норми для розглянутої вправи наведені в табл. 9.6. Зрошувальна норма розрахована як сума поливних норм склала 3000 м<sup>3</sup>/га. Два останніх поливи в кінці вегетації, в даному випадку можна відмінити без втрати врожаю. Це дасть можливість досягти достатньої вологості зерна на період збирання врожаю. В такому випадку зрошувальна норма складе 2400 м<sup>3</sup>/га.

**Таблиця 9.6 – Режим зрошення кукурудзи на зерно в 2019 р. за даними метеостанції Синельникове**

№ поливу	Середня дата поливу	Полівна норма мм
1	22.05	30
2	2.06	30
3	12.06	30
4	15.06	30
5	19.06	30
6	25.06	30
7	14.07	30
8	4.09	30

Зрошувальна норма – 240 мм або 2400 м<sup>3</sup>/га

### Вправа 9.3. Розрахунок режиму зрошення удосконаленням біокліматичним методом В.П. Остапчика

- Дано: 1. Подекадні атмосферні опади (табл. 9.1).  
2. Середньодекадні значення дефіцитів вологості повітря.  
3. Середньодекадні значення температур повітря.  
4. Глибина залягання ґрунтових вод – 10 м.  
5. Водно-фізичні властивості ґрунту (табл. 9.2).  
6. Досточкова поливна норма – 30 мм.

- Необхідно: 1. Розрахувати сумарне водоспоживання удосконаленням біокліматичним методом В.П. Остапчика.  
2. Розрахувати хід запасів води і дати поливу аналітичним методом.

#### Розв'язання

Розрахунок режиму зрошення сільськогосподарських культур удосконаленням біокліматичним методом В.П. Остапчика виконують подекадно для вегетаційного періоду в такій послідовності (табл.9.7). При відсутності даних про випаровування з водної поверхні випаровувача ГГІ-3000, можна скористатися значеннями випаровуваності розрахованої за формулою М.М. Іванова, яка використовує середні температури і відносні вологості повітря за розрахунковий період. Для декадних періодів формула М.М. Іванова має вигляд

$$E_0 = 0,06(t + 25)^2 \left(1 - \frac{a}{100}\right), \quad (9.9)$$

1. Середню температуру повітря за декадні періоди записуємо у відповідності до вихідних даних (табл. 9.1).
2. При відсутності відносної вологості повітря її можна перерахувати через дефіцит вологості повітря і її температуру.

$$a = \left(1 - \frac{d}{l_a}\right) 100\%, \quad (9.10)$$

де  $d$  – дефіцит вологості повітря, мб;

$l_a$  – пружність насичення водяного пару при даній температурі, мб;

Величина  $l_a$  залежить від температури повітря і її можна визначити за додатком А або формулою (5.37).

3. Суми атмосферних опадів за декаду беруть із вихідних даних (табл. 9.1), ефективні атмосферні опади визначають  $\mu P$ , мм, та кількість діб в розрахунковий період з опадами більше 1 мм ( $N_P$ ), визначають за вихідними даними.
4. Розраховують суми за декадами середньодобових температур ( $\sum t = 10 \cdot t$ , °C).

Таблиця 9.7 – Розрахунок режиму зростання кукурудзи на зерно удосконалення біокліматичним методом В.Л. Остапчука за даними метеостанції Смильницької в 2019 р.

№ з/п	Показник	Вегетаційний період															Верес.	
		Квіт.			Травень			Червень			Липень			Серпень				
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	$t, ^\circ\text{C}$	13,8	14,9	19,0	20,0	23,4	23,1	20,9	22,2	18,5	21,6	22,4	20,8	21,30	25,80	27,09	24,57	1
2	$I_a, \text{мб}$	15,78	16,94	21,97	23,38	28,78	32,06	28,26	24,72	22,53	26,76	21,30	25,80	21,30	25,80	27,09	24,57	1
3	$d, \text{мб}$	8,0	6,0	10,0	10,0	14,0	18,0	17,0	12,0	10,0	11,0	9,0	12,0	15,0	14,0	14,0	14,0	1
4	$a, \%$	49,3	64,6	54,5	57,2	51,4	43,8	39,8	51,4	55,6	58,8	57,8	53,5	44,6	43,0	41,2	36,6	1
5	$E_0, \text{мм}$	45,8	33,8	52,9	52,0	68,4	84,9	83,5	61,4	52,5	54,9	48,0	60,6	74,6	71,7	71,7	71,7	1
6	$R, \text{мм}$	15,0	33,0	1,0	13,0	35,0	0,6	4,0	50,0	6,0	37,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0	1
7	$\mu P, \text{мм}$	10,5	16,1	0,7	9,1	24,5	0,4	2,8	35,0	4,2	25,9	51,1	0,0	0,0	0,0	0,0	9,1	1
8	$N_p$	3	2	0	1	4	0	1	5	2	3	4	0	0	0	0	1	1
9	$\Sigma t, ^\circ\text{C}$	138	149	190	200	234	252	231	209	194	222	185	216	224	208	208	208	1
10	$\Sigma t, ^\circ\text{C}$	138	287	477	677	911	1163	1394	1603	1797	2019	2204	2420	2644	2852	2852	2852	1
11	$\Sigma t \phi$	0/2	215/3		565/4	830/5		1300/6	1400/7			2050/8		2600/9				1
12	$\Phi/\phi$	2/0	3/0,14		4/0,53	5/0,75		6/1,00	7/1,00			8/1,00		9/1,00				1
13	$\phi$	0	0,14	0,34	0,53	0,75	0,88	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	$\Phi/k_\phi$	2/0,60	3/0,90		4/0,90	5/0,98		6/1,15	7/1,02			8/0,89		9/0,65				1
15	$k_\phi$	0,6	0,9	0,9	0,9	0,98	1,06	1,15	1,02	0,98	0,92	0,89	0,77	0,65	0,6			1
16	$k_{\Sigma p}$	0,598	0,638	0,338	0,498	0,838	0,334	0,408										1
17	$E_{\Sigma p}, \text{мм}$	27,4	21,6	17,8	25,9	54,3	28,3	0,0										1
18	$E_6, \text{мм}$	27,5	30,4	17,6	45,8	67,0	90,0	99,5	62,6	51,5	50,5	42,7	46,7	48,5	43,0	41,2	36,6	1
19	$E, \text{мм}$	23,3	19,4	23,8	31,4	54,9	70,2	81,6	53,2	43,7	43,0	36,3	39,7	41,2	36,6	36,6	36,6	1
20	$k_{\Sigma p}, \text{мм}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	1
21	$W_{\Sigma p}, \text{мм}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
22	$D, \text{мм}$	12,8	3,3	23,1	22,3	30,4	69,8	78,8	18,2	39,5	17,1	-14,8	39,7	41,2	27,5	27,5	27,5	1
23	$W, \text{мм}$	36,3	23,5	20,2	27,2	4,8	34,5	24,7	5,9	17,7	8,1	21,1	35,9	26,2	15,0	17,5	17,5	1
24	$m, \text{мм}$			30		60	60	60	60	30	30	30	30	30	30	30	30	1
25	$S, \text{мм}$																	1
26	Дата польову			19.05		2.06	15.06	23.06	3.07	14.07	25.07	19.08	26.08	5.09				1

5. Визначають суми середньодобових температур повітря зростаючим підсумком від дати посіву (відновлення вегетації) до кінця водоспоживання ( $\sum \sum t, ^\circ\text{C}$ ).
6. Знаючи суму температур, необхідну для настання кожної з фенологічних фаз розвитку культури (додаток Д) та дані за сумами температур повітря на кожен декаду вегетації, знаходять декади, в які ці фази ( $\Phi$ ) настають.  
Наприклад: для кукурудзи середньостиглих гібридів для досягнення фази 3 (сходи) необхідно щоб сума температур повітря з початку вегетації склала  $215 ^\circ\text{C}$ . Така сума буде досягнута в першу декаду травня. Аналогічно знаходять строки настання інших фаз розвитку 4-та фаза (4-й листок) – 3 декада травня; 5-та фаза (8-й листок) – 1 декада червня і т.д.
7. Знаючи декади, в які настають ті чи інші фази розвитку сільськогосподарської культури за додатком Д встановлюють для цих декад (фаз розвитку) ступінь покриття поля рослинами ( $\varphi$ ).
8. Для розрахованих декад переписують встановлене значення  $\varphi$ , а для інших декад розраховують, методом прямої інтерполяції між сусідніми декадами в які значення, уже відомі за додатком Д.
9. Аналогічним чином встановлюють за додатком Д для декад, в які настають фенологічні фази  $\Phi$  біологічний коефіцієнт  $k_\phi$ .
10. Для інших декад  $k_\phi$  як і  $\varphi$ , розраховують методом прямої інтерполяції між сусідніми декадами.
11. Коефіцієнт випаровування ( $k_z$ ) розраховують за формулою (4.11) для декад в яких ступінь покриття поверхні поля рослинами  $\varphi$  менше 1.
12. За формулою (4.11) необхідно розрахувати значення випаровування з поверхні ґрунту ( $E_z$ , мм) для декад, де воно суттєве.
13. Транспірація рослинами ( $E_\phi$ , мм) розраховується за формулою (4.5).
14. Сумарне випаровування ( $E$ , мм) необхідно розраховувати за формулою (4.4). Для врахування мікрокліматичного ефекту і підживлення з нижче розташованих горизонтів необхідно ввести поправку 0,85.
15. Глибину залягання рівня ґрунтових вод для кожної декади ( $h_{zp}$ , м) визначають за вихідними даними. В даному випадку глибина залягання ґрунтових вод 10 м. При такій глибині залягання ґрунтові води не підживлюють кореневмісний розрахунковий шар, тому для всіх декад прийняте значення  $W_{zp} = 0$ .
16. Дефіцит водоспоживання ( $D$ , мм) подекадно розраховують як і в п.9.2. за формулою  $D = E_m - (\mu \cdot P + W_{zp})$ .
17. Далі строки поливу, як і в п.9.2. можна визначити графічним способом за інтегральною кривою дефіциту водоспоживання. Як приклад, в цій праві розглянуто визначення строків поливу табличним (аналітичним)

способом. Визначають ефективні вологозапаси ( $W_{ef}$ , мм) за формулою (9.8) на початок першої декади вегетації.

18. На кінець цієї декади вологозапаси визначають як різницю між початковими запасами вологи в ґрунті та дефіцитом водоспоживання  $D$  за цю декаду. Якщо  $D$  в розрахункову дату буде менше нуля, то його необхідно додавати до початкових вологозапасів.

Отримані запаси вологи на кінець першої декади будуть початковими для другої декади, а на кінець другої декади також розраховують вологозапаси як різницю між початковими та дефіцитом водоспоживання. Таким чином проводять розрахунки до кінця вегетації.

19. Ефективні запаси вологи на кінець кожної декади порівнюють з максимально допустимими ефективними вологозапасами, які можуть затриматись в кореневмісному шарі ґрунту  $W_{ef}^{\max}$ . Останні, розраховують з умов наявності в активному шарі ґрунту вологозапасів при найменшій вологоємкості

$$W_{ef}^{\max} = 10 \cdot h \cdot \gamma (\beta_{HB} - \beta_{\min}).$$

В разі коли отримані вологозапаси на кінець декади будуть більші, ніж  $W_{ef}^{\max}$ , необхідно передбачити глибинний скид ( $C$ , мм), який визначають як різницю між запасами вологи на кінець декади та  $W_{ef}^{\max}$ .

При цьому величину запасів на кінець декади прирівнюють  $W_{ef}^{\max}$ .

20. Якщо запаси вологи на кінець декади будуть рівними або меншими нуля необхідно передбачити поливи ( $m$ , мм). Величину поливів обчислюють або за формулами (7.4) та (7.5) для відповідних фаз розвитку, або назначають як достовірну. При цьому ефективні запаси вологи в розрахунковому шарі ґрунту на кінець декади необхідно збільшити на величину  $m$ . Якщо і при цьому ефективні вологозапаси будуть меншими нуля, то необхідно передбачити два поливи, поливною нормою  $m$ . В даній вправі всі поливи призначені по 30 мм.

21. Дати поливів визначають в ті декади де вони необхідні. День декади, коли необхідно провести перший полив ( $n_1$ ), визначають за формулою (8.4). В даному випадку в другу декаду травня

$$n_1 = \frac{20,2 \cdot 10}{23,1} = 8,7,$$

приймають 9 день другої декади, тобто 19.05. Якщо необхідно провести два поливи, то день декади, коли необхідно проводити другий полив ( $n_2$ ), визначають за формулою (8.5). Так наприклад, в другу декаду червня другий полив необхідно провести

$$n_2 = \frac{(34,5 + 30) \cdot 10}{69,8} = 9,2 \text{ день, тобто 19.06.}$$



Отже, розраховані всі інші поливи, результати розрахунку строків і норм поливів зведені в табл. 9.8

**Таблиця 9.8 – Режим зрошення кукурудзи на зерно в 2019 р. за даними метеостанції Синельникове**

№ поливу	Середня дата поливу	Поливна норма мм
1	19.05	30
2	2.06	30
3	10.06	30
4	15.06	30
5	19.06	30
6	23.06	30
7	27.06	30
8	3.07	30
9	14.07	30
10	25.07	30
11	19.08	30
12	26.08	30
13	5.09	30

Зрошувальна норма – 390 мм або 3900 м<sup>3</sup>/га. Як і в попередньому випадку останні три поливи можна відмінити без значного зниження врожаю.

## **Вправа 9.4. Розрахунок режиму зрошення біофізичним методом Д.А. Штойка**

- Дано: 1. Подекадні атмосферні опади (табл. 9.1).  
2. Середньодекадні значення дефіцитів вологості повітря.  
3. Середньодекадні значення температур повітря.  
4. Глибина залягання ґрунтових вод – 10 м.  
5. Водно-фізичні властивості ґрунту (табл.9.2).  
6. Досточкова поливна норма – 40 мм.

- Необхідно: 1. Розрахувати сумарне випаровування і дефіцит водоспоживання кукурудзи на зерно.  
2. Розрахувати строки поливу аналітичним методом.

### **Розв'язок**

Розрахунок режиму зрошення сільськогосподарських культур біофізичним методом Д.А. Штойка, виконують подекадно для вегетаційного періоду в такій послідовності (табл.9.9).

1. За даними найближчої метеостанції встановлюють середньодекадну температуру повітря ( $t_c$ , °C), та відносну вологість повітря ( $a$ , %). При відсутності даних про відносну вологість її можна перерахувати маючи інформацію про температуру та дефіцит вологості повітря за формулою (9.10). Для даної вправи відносна вологість повітря взята з вправи 9.3.



2. Сума ефективних атмосферних опадів за вегетацію визначається як і в попередніх вправах ( $10 \cdot \mu \cdot P$ , м<sup>3</sup>/га).
3. Сума середньодобових температур повітря за декаду визначають як  $\sum t = n \cdot t$ , де  $n$  – кількість днів в декаду.
4. Необхідні період в яких використовують формулу (4.12), і в який (4.13) за табл. 9.10.

**Таблиця 9.10 – Строки застосування формул (4.12) та (4.13) для розрахунків сумарного випаровування сільськогосподарських культур біофізичним методом УкрНДІЗЗ (за Д.А.Штойко)**

Культура	Формула (4.12)	Формула (4.13)
Пшениця озима, ячмінь озимий	Після фази молочної стиглості	Від весняного відростання до молочної стиглості (від виходу в трубку до колосіння показник, отриманий за формулою, необхідно помножити на 1,25)
Пшениця яра, ячмінь ярий	Від сходів до куціння, після молочної стиглості	Від куціння до молочної стиглості
Люцерна в рік після збирання ячменю	Перший полив проводять після збирання ячменю на зерно. В період відростання люцерни та 10 днів після укосів	В інший час вегетаційного періоду
Фуражна люцерна минулих років	Перші 10 днів після весняного відростання і збирання кожного укосу	В інший час вегетації
Кукурудза	Від сходів до утворення 12-14-го листка, після молочно-воскової стиглості	Від утворення 12-14-го листка до молочно-воскової стиглості
Соя	Від сходів до початку квітання, після початку дозрівання	Від початку квітання до початку дозрівання
Буряки цукрові та кормові	Від сходів до змикання листків між рядками, після 20 серпня	Від змикання листків між рядками до 20 серпня
Помідор	Від сходів чи посадки до утворення зав'язі плодів	Від утворення зав'язі плодів до масового збирання врожаю
Картопля	Від сходів до бутонізації	Від бутонізації до початку жовтіння бадилля
Кукурудза поживна (поукісна)	Від передпосівного чи сходопонукаючого поливу до утворення 12-14-го листка	Після утворення 12-14-го листка
Багатокомпонентні суміші поживного посіву	Від передпосівного поливу до куцвання злакових компонентів	В інший період вегетації
Культурні багаторічні пасовища	5-7 днів після весняного відростання та кожного випасання	В інший час до випасання

6. Визначити сумарне випаровування ( $E$ , м<sup>3</sup>/га) за формулою (4.12) або (4.13).
7. Коефіцієнт, який враховує підживлення з нижче розташованих шарів ґрунту ( $g$ ) можна прийняти для всього періоду вегетації рівним 0,95, так як майже 95 % сумарного випаровування відбувається із розрахункового шару ґрунту, де розташована основна маса кореневої системи, і тільки 5 % – із глибшого шару.
8. Сумарне випаровування з урахуванням підживлення з нижче розташованих шарів ґрунту визначають як добуток  $E_{zp} = E \cdot g$ .
9. Глибину залягання ґрунтових вод ( $h_{zp}$ , м) визначають за вихідними даними. В даній вправі вона прийнята 10 м.
10. Підживлення ґрунтовими ( $W_{zp}$ ) при глибині залягання ґрунтових вод  $h_{zp}$  (більшій 4,0 м) можна прийняти рівним нулю.
11. Дефіцит водоспоживання за декаду, як і в попередніх вправах, визначають як різницю  $D = E_g - 10\mu P$ .
12. Подальші розрахунки строків поливів можна проводити графічним способом (як показано у вправі 9.2), або аналітичним способом (як у вправі 9.3). В табл.9.9 строки поливів розраховані табличним способом.
13. Результати розрахунку поливів зведені до табл. 9.11.

**Таблиця 9.11 – Режим зрошення кукурудзи на зерно в 2019 р. за даними метеостанції Синельникове**

№ поливу	Середня дата поливу	Поливна норма м <sup>3</sup> /га
1	1.06	300
2	8.06	300
3	13.06	300
4	17.06	300
5	21.06	300
6	26.06	300
7	5.07	300
8	15.07	300
9	19.08	300
10	27.08	300

Зрошувальна норма – 3000 м<sup>3</sup>/га. Як і в попередньому випадку можна останні два поливи можна відмінити без значного зниження врожаю.

## **Вправа 9.5. Розрахунок режиму зрошення методом ФАО**

- Дано: 1. Найближча метеостанція Комісарівка  
 2. Суми атмосферних опадів за декаду (табл. 9.12).

Таблиця 9.12 – Метеорологічні дані за 2019 р.

Декада	Місяць											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Атмосферні опади, мм												
1	12	1	8	10	23	40	90	27	0	36	0,7	30
2	19	7	2	3	5	0	5	2	6	0	13	19
3	39	2	5	4	19	3	9	0	12	13	26	41
Середня температура повітря												
1	-4,8	0,4	4,0	9,0	14,5	22,7	21,0	18,5	20,2	10,0	4,3	-1,6
2	-4,7	1,2	4,1	13,3	19,1	24,7	19,1	21,0	15,2	12,1	-0,3	-2,2
3	-4,3	-1,4	4,7	14,7	20,0	22,5	22,0	22,2	11,5	9,7	-3,0	-1,4
Максимальна температура повітря												
1	2	5	16	25	24	33	36	31	33	25	13	3
2	3	11	15	26	29	33	30	32	29	25	4	1
3	4	7	19	29	32	34	33	34	23	21	5	2
Мінімальна температура повітря												
1	-14	-4	-8	-7	8	14	9	8	9	-3	-5	-17
2	-19	-8	-7	2	6	15	10	13	0	1	-6	-6
3	-23	-12	-6	1	10	8	12	6	-2	0	-11	-6
Дефіцит вологості повітря												
1			3	7	5	10	11	7	12	3	1	
2			3	8	9	15	8	12	9	6		
3			4	9	9	13	10	15	5	3		
Тривалість сонячного сяяння, год.												
1	14	19	28	48	66	86	95	110	87	66	40	15
2	16	20	34	53	75	88	100	98	80	58	29	14
3	18	23	42	59	82	90	120	92	73	49	18	13

3. Середньодекадні значення температур повітря.
4. Максимальні температури повітря за декаду.
5. Мінімальні температури повітря.
6. Середньодекадні значення дефіцитів вологості повітря.
7. Тривалість сонячного сяйва.
8. Глибина залягання ґрунтових вод – 10 м.
9. Достоква поливна норма – 40 мм.
10. Ґрунт – чорнозем звичайний середньопотужний малогумусний середньосуглинистий. Водно-фізичні властивості наведені в табл. 9.13.
11. Поливи здійснюють цілодобово.
12. Географічні координати: пн. ш. 48,43567° с. д. 33,89602°
13. Висота над рівнем моря – 106 м.

**Таблиця 9.13 – Водно-фізичні властивості ґрунту**

Глибина, см	Щільність ґрунту, г/см <sup>3</sup>	Вологість ґрунту при НВ, %
0-10	1,15	28,6
10-20	1,18	25,7
20-30	1,27	24,2
30-40	1,28	23,0
40-50	1,32	22,4
50-60	1,38	22,0
60-70	1,36	21,7
70-80	1,37	21,6
80-90	1,40	21,7
90-100	1,42	21,4

- Необхідно: 1. Розрахувати сумарне водоспоживання еталонної культури за формулою Пенмана-Монтейна.  
 2. Розрахувати сумарне водоспоживання кукурудзи.  
 3. Встановити дати поливу аналітичним методом.

#### Розв'язання

Розрахунок режиму зрошення виконуємо подекадно в табл. 9.14.

1. Розрахунок сумарного водоспоживання еталонної культури за формулою Пенмана-Монтейна здійснюють за формулою (4.65). Так як прямі вимірювання складових теплового балансу не проводились. Скористаємось формулами зв'язку актинометричних вимірювань з метеорологічними величинами.

Чиста радіація на поверхні рослин ( $R_n$ ) – це різниця між прихідною і висхідною чистою короткохвильовою радіацією ( $R_{ns}$ ) і висхідною чистою довгохвильовою радіацією ( $R_{nl}$ ) за формулою (5.26).

Чиста сонячна або чиста короткохвильова радіація ( $R_{ns}$ ) отримана із балансу між прихідною і відбитою сонячною радіацією (5.24). Альbedo або коефіцієнт відбиття рослин, дорівнює 0,23 для гіпотетичної еталонної трав'яної поверхні. Прихідну сонячну радіацію ( $R_s$ ) при відсутності вимірювань, можна розрахувати за формулою Ангстрема (5.14), яка пов'язує сонячну радіацію з позаземною радіацією і відносною тривалістю сонячного саява. Фактична тривалість сонячного саява, в год. ( $n$ ) визначається на обмеженій кількості метеостанцій. У Дніпропетровській області такі спостереження проводяться за геліографом тільки на метеостанції Комісарівка. Максимально можлива тривалість сонячного саяння в год. або годин денного світла ( $N$ ) залежить від кута заходу Сонця ( $\omega_s$ ) і визначається за формулою (5.13).

Кут на заході можна розрахувати за формулою (5.6), де  $\varphi$  – широта географічних координат (для метеостанції Комісарівка  $\varphi = 48,43567^\circ$ ).

$$\varphi = \frac{\pi}{180} \cdot 48,43567 = 0,845 \text{ рад.}$$

Сонячний нахил визначають за формулою (5.5) залежить від порядкового номеру дня року  $J$ .

Порядковий номер для середини третьої декади квітня (25 квітня) складає  $J = 115$ .

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} 115 - 1,39\right) = 0,227 \text{ рад.}$$

Тоді відповідно до формули (5.6)

$$\omega_s = ar \cos[-tg(\varphi)tg(\delta)] = ar \cos[-tg(0,845)tg(0,227)] = 1,834 \text{ рад.}$$

За формулою (5.13)  $N = \frac{24}{\pi} \omega_s = \frac{24}{\pi} 1,834 = 14,01$  год. за добу.

За декаду  $N = 10 \cdot 14,01 = 140,1$  год.

За третю декаду квітня відношення  $\frac{n}{N} = \frac{59}{140,1} = 0,421$ .

$a_s$  і  $b_s$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від атмосферних умов і сонячного нахилу. Там, де дані за фактичною сонячною радіацією відсутні і не можуть бути здійснені їх калібрування, рекомендується використовувати значення  $a_s = 0,25$  і  $b_s = 0,50$ .

Позаземну радіацію  $R_a$  визначають за рівнянням (5.2) або з додатку М.

Відповідно до формули (5.2). У формулі прийняті такі значення  $G_{sc} = 0,0820$  МДж/(м<sup>2</sup>·хв.) – сонячна постійна;  $d_r$  – зворотна відстань Земля-Сонце, що розраховується за рівнянням (5.4). Для третьої декади квітня (25 квітня)  $d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} 115\right) = 0,987$  рад. Тоді,

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} 0,0820 \cdot 0,987 \{1,834 \sin(0,845) + \cos(0,845) \cos[0,227 \cdot \cos(1,834)]\} = 75,48 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{добу).}$$

За декаду ця величина складе 754,8 МДж/(м<sup>2</sup>·декаду). Всі складові формули (5.14) знайдені, а отже можна розрахувати сонячну радіацію за формулою Ангстрема:

$$R_s = (0,25 + 0,50 \cdot 0,415) \cdot 75,48 = 34,76 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{добу)} \text{ або } 347,6 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{декаду).}$$

Чиста сонячна радіація  $R_{sn}$  за відомих складових формули (5.24) складе

$$R_{ns} = (1 - 0,23) 34,76 = 26,76 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{добу).}$$

Чисту довгохвильову радіацію ( $R_{ni}$ ) можна розрахувати за формулою (5.25), прийнявши такі вихідні дані для третьої декади квітня:

- постійна Стефана-Больцмана –  $4,903 \cdot 10^{-9}$  МДж/(К<sup>4</sup>·м<sup>2</sup>·доба);
- максимальна абсолютна температура  $29 + 273,16 = 302$  °К;
- мінімальна абсолютна температура  $1 + 273,16 = 274$  °К;
- розрахована за рівнянням (5.14) сонячна радіація – 13,04 МДж/(м<sup>2</sup>·добу);

Таблица 9.13 – Розрахунок режиму зрошення кукурудзи методом ФАО  
Перший етап

№ з/п	Показник	Вегетаційний період												Верес.	
		Травень			Червень			Листопад			Серпень				
	Квіт.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	$P$ , мм	4	23	5	19	40	0	3	90	5	9	27	2	0	0
2	$t$ , °C	14,7	14,5	19,1	20,0	22,7	24,7	22,5	21,0	19,1	22,0	18,5	21,0	22,2	20,2
3	$t_{max}$ , °C	29	24	29	32	33	33	34	36	30	33	31	32	34	33
4	$t_{min}$ , °C	1	8	6	10	14	15	8	9	10	12	8	13	6	9
5	$d$ , мб	9	5	9	9	10	15	13	11	8	10	7	12	15	12
6	$n$ , год.	59	66	75	82	86	88	90	95	100	120	110	98	92	87
7	$J$ , день	115	125	135	145	156	166	176	186	196	206	217	227	237	248
8	$\delta$ , рад.	0,227	0,282	0,329	0,366	0,394	0,407	0,408	0,397	0,375	0,341	0,292	0,239	0,179	0,106
9	$\omega$ , рад	1,835	1,824	1,872	1,913	1,946	1,962	1,963	1,950	1,923	1,885	1,834	1,781	1,725	1,661
10	$N$ , год.	14,02	13,93	14,30	14,61	14,86	14,99	15,00	14,90	14,69	14,40	14,01	13,61	13,18	12,69
11	$n/N$	0,421	0,474	0,524	0,561	0,579	0,587	0,600	0,638	0,681	0,833	0,785	0,720	0,698	0,686
12	$d_r$ , рад	0,987	0,982	0,977	0,974	0,970	0,968	0,967	0,967	0,968	0,970	0,973	0,976	0,980	0,986
13	$R_{ев}$ , МДж/м <sup>2</sup> /доб.	75,48	74,77	75,71	76,46	77,03	77,27	77,22	76,88	76,27	75,44	74,34	73,21	72,00	70,63
14	$R_s$	34,76	36,41	38,78	40,57	41,54	42,00	42,47	43,73	45,03	50,29	47,77	44,66	43,13	41,87
15	$R_{vis}$	26,76	28,03	29,86	31,24	31,99	32,34	32,70	33,67	34,67	38,73	36,78	34,39	33,21	32,24
16	$(T_{max}+T_{min}^4)/2$	34,29	34,44	35,32	37,02	38,21	38,44	37,14	37,93	36,47	37,75	36,30	37,70	36,71	37,08
17	$e^o(T)$ , КПа	1,67	1,65	2,21	2,34	2,76	3,11	2,73	2,49	2,21	2,64	2,13	2,49	2,68	2,37
18	$e_0$ , КПа	0,77	1,15	1,31	1,44	1,76	1,61	1,43	1,39	1,41	1,64	1,43	1,29	1,18	1,17
19	$(0,34+0,14\sqrt{e_0})$	0,22	0,19	0,18	0,17	0,15	0,16	0,17	0,18	0,17	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19
20	$R_{50}$	56,77	56,24	56,94	57,51	57,94	58,12	58,08	57,82	57,36	56,74	55,91	55,06	54,16	53,12
21	$1,35(R_s/R_{50}-0,35)$	0,48	0,52	0,57	0,60	0,62	0,63	0,64	0,67	0,71	0,85	0,80	0,75	0,73	0,71
22	$R_{nl}$	3,54	3,42	3,61	3,84	3,64	3,90	4,09	4,46	4,49	5,13	5,03	5,09	5,01	5,00
23	$R_{nl}$	23,22	24,61	26,25	27,40	28,34	28,44	28,61	29,22	30,18	33,60	31,75	29,30	28,20	27,24
24	$\Delta$ , КПа/°C	0,108	0,107	0,138	0,145	0,167	0,186	0,165	0,153	0,138	0,161	0,133	0,153	0,163	0,146
25	$E_0$ , мм/добу	6,35	5,84	7,38	7,73	8,37	9,26	8,86	8,56	8,10	9,56	8,20	8,74	9,03	8,19



## Другий етап

№ з/п	Показник	Квіт.	Вегетаційний період												Верес.	
			Травень			Червень			Липень			Серпень				
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
25	$E_0$ , мм/добу	6,35	5,84	7,38	7,73	8,37	9,26	8,86	8,56	8,10	9,56	8,20	8,74	9,03	8,19	
26	$K_c$	0,30	0,30	0,30	0,30	0,38	0,80	1,20	1,20	1,20	1,20	0,98	0,72	0,44	0,30	
27	$E$ , мм	19,0	17,5	22,1	23,2	31,8	74,1	106,3	102,8	97,2	114,8	80,4	62,9	39,7	24,6	
28	$D$ , мм	15,0	-5,5	17,1	4,2	-8,2	74,1	103,3	12,8	92,2	105,8	53,4	60,9	39,7	24,6	
29	$W$ , мм	36,3	21,3	26,7	9,6	5,4	13,6	19,5	-3,8	23,5	11,3	-14,5	12,1	31,2	31,5	6,9
30	$m$ , мм						80	80	40	80	80	80	80	40		
31	Дата						11.06	21.06	1.07	12.07	21.07	1.08	12.08	27.08		
							17.06	26.06		16.07	24.07	5.08	18.08			

- розрахована за формулою (5.16) радіація для ясного неба

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot 106) \cdot 75,48 = 56,77$$

- висота на рівнем моря – 106 м;

- при відсутності даних про пружність водяної пари і наявності інформації про дефіцит вологості повітря, пружність водяної пари визначають за формулою

$$e_a = e^\circ(T) - d$$

де  $d$  – дефіцит вологості повітря, кПа;

$e^\circ(T)$  – тиск пари насичення при температурі  $T$ , кПа;

Тиск пари насичення можна розрахувати за формулою (5.37), або за додатком Е.

Для середньої температури третьої декади квітня 14,7 °С, тиск насичення пари складе  $e^\circ(T) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot 14,7}{14,7 + 237,3}\right) = 1,67$  кПа, а пружність пари  $e_a = 1,67 - 0,90 = 0,77$  кПа.

**Примітка.** 1 кПа = 10 мб

$$R_{nl} = 4,909 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{302^4 + 274^4}{2} \right] \left( 0,34 - 0,14 \sqrt{0,77} \right) \left( 1,35 \frac{34,76}{56,77} - 0,35 \right) = 3,54 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу}).$$

Чиста радіація за формулою (5.26) складе

$$R_n = 26,76 - 3,54 = 23,22 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу}).$$

Повертаючись до формули (4.65) необхідно визначити щільність теплового потоку ґрунту ( $G$ , МДж/(м<sup>2</sup>·добу)) за формулою (5.27), або прийняти твердження, що амплітуда теплового потоку протягом 1 або 10 днів для еталонної трав'яної поверхні відносно мала, то нею можна знехтувати (Allen, R.G. 1992), тобто  $G = 0$ .

Для розрахунку евапотранспірації потрібно знати градієнт кривої тиску, тобто відношення між тиском пари насичення і температурою  $\Delta$ . Його можна визначити за формулою (5.39)

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot 14,7}{14,7 + 237,3}\right) \right]}{(14,7 + 237,3)^2} = 0,108.$$

Психрометричну постійну ( $\gamma$ ) можна визначити за формулою (5.34), при цьому атмосферний тиск необхідно прийняти відносно висоти над рівнем моря за формулою (5.33)

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 \cdot 106}{293} \right)^{5,26} = 101,1 \text{ кПа}, \quad \gamma = \frac{0,665 \cdot 101,1}{1000} = 0,067.$$

При відсутності відомостей про швидкість вітру ( $u_2$ ), можна прийняти її рівною середній 2 м/с.

I, нарешті, всі складові рівняння (4.65) визначені і можна розрахувати евапотранспірацію еталонної культури в третій декаді квітня 2019 року.

$$E_0 = \frac{0,408 \cdot 0,108 \cdot (23,22 - 0) + 0,067 \frac{900}{14,7 + 273} \cdot 2 \cdot 0,9}{0,108 + 0,067(1 + 0,34 \cdot 2)} = 6,35 \text{ мм/добу.}$$

При розрахунках за декаду евапотранспірація складе 63,35 мм або 635 м<sup>3</sup>/га.

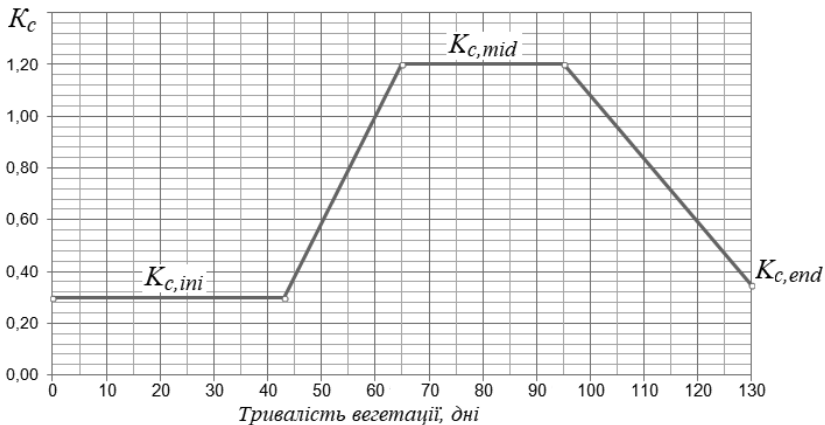
Аналогічним чином можна розрахувати евапотранспірацію еталонної культури за кожен декаду вегетації (див. табл. 9.14).

2. При розрахунках сумарного водоспоживання конкретної сільськогосподарської культури визначають коефіцієнт  $K_c$  цієї культури, який змінюється з часом.

Тривалість фаз розвитку кукурудзи пізньостиглих гібридів (130 діб): сівба – поява сходів – 12 діб; від появи сходів до повних сходів – 7 днів; фаза 3-й – 8-й листок – 24 доби; 8-й – 11-й листок – 6 діб; 11-й – 17-й листок – 16 діб; викидання волоті – 10 діб; квітування волоті – 10 діб; налив зерна – 15 діб; молочна стиглість – 10 діб; воскова стиглість – 10 діб; повна стиглість – 10 діб.

Тривалість початкового періоду (сівба – 8-й листок) – 43 доби. Стадія розвитку рослини (8-й листок – 17-й листок) – 22 доби. Стадія середини сезону (15-й листок – молочна стиглість) – 30 діб. Стадія кінця сезону (молочна стиглість – повна стиглість) – 35 діб.  $K_{c,ini} = 0,3$ ,  $K_{c,mid} = 1,20$ ,  $K_{c,end} = 0,35$ . Використавши тривалість кожної стадії розвитку і коефіцієнт  $K_c$  будуюмо графік його зміни (рис. 9.3).

Розрахунок евапотранспірації за декадах для кукурудзи визначають як добуток  $E = E_0 \cdot K_c$ . Значення коефіцієнта  $K_c$  для кожної декади приймають з графіка рис. 9.3.



**Рисунок 9.3 – Крива коефіцієнта культури для розрахунку евапотранспірації кукурудзи середньопізніх гібридів**

3. Подальший розрахунок строків поливів ведуть аналогічно запропонованого, наприклад, методом В.П. Остапчика (див. вправа 9.3).

Строки і норми поливів наведені в табл. 9.15.

Для зменшення кількості поливів і зрошувальної норми можна останні три поливи відмінити, і більш ретельно розрахувати нижню межу зволоження у некритичні періоди вегетації, застосувавши, наприклад, графоаналітичний метод встановлення строків поливів.

**Таблиця 9.15 – Режим зрошення кукурудзи на зерно в 2019 р. за даними метеостанції Комісарівка**

№ поливу	Середня дата поливу	Поливна норма м <sup>3</sup> /га
1	11.06	400
2	17.06	400
3	21.06	400
4	26.06	400
5	1.07	400
6	12.07	400
7	16.07	400
8	21.07	400
9	24.07	400
10	1.08	400
11	5.08	400
12	12.08	400
13	18.08	400
14	27.08	400

Зрошувальна норма складає 5600 м<sup>3</sup>/га

Метод розрахунку режиму зрошення ФАО краще застосовувати при розрахунку оперативного режиму зрошення, де обчислення ведуть за добові періоди (інші методи дають велику похибку за такі короткі періоди).

## 10. ВИБІР РОКУ ЗАДАНОЇ ЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ

### 10.1 Оцінка природного зволоження

В наш час запропоновано багато методів оцінки волого- і теплозабезпеченості території. Однак до цих пір не вирішене питання про обґрунтування вибору того, або іншого методу для вирішення конкретних завдань в галузі водогосподарського проєктування і, зокрема, при визначенні розмірів площі проведення водних меліорацій в різні за зволоженістю роки.

Надаючи велике значення роботам багатьох дослідників та узагальненням результатів багатьох спостережень над складовими рівняння водного і теплового балансу, а також над основними кліматичними елементами, необхідно відмітити, що об'єктивним показником зволоження можна вважати характеристики, отримані шляхом порівняння наявних і потрібних ресурсів вологи.

Аналізуючи існуючі методи оцінки зволоження агроландшафтів необхідно виходити з таких принципів:

- 1) у показнику зволоження повинна бути врахована потреба сільськогосподарських угідь у воді;
- 2) він повинен включати метеорологічні елементи або окремі складові управління водного і теплового балансів, на які можна активно впливати існуючими інженерними методами і кількісно визначати об'єми водних меліорацій, слугувати підставою для прогнозування норм осушення і зрошення, а також поливного режиму сільськогосподарських культур.

Для оцінки вологозабезпеченості рослин в різних частинах земної кулі врахування кількості атмосферних опадів є недостатньо обґрунтованим. Це було відмічене К.С. Веселовським ще в 1857 р., який спробував співставити суму атмосферних опадів з витратами вологи на випаровування. Однак врахування фактичного випаровування дуже складне, тому, для прикладу, багато дослідників застосовували випаровуваність або сукупність кліматичних факторів, які визначають теплоенергетичні ресурси клімату.

Вперше для характеристики умов зволоження природних зон А.І. Воейков і В.В. Докучаєв використовували відношення суми атмосферних опадів до випаровування.

У 1904 р. індекс зволоження був розроблений Г.Н. Висоцьким, який вважав, що відношення опадів і випаровуваності є найкращим

показником для оцінки волого лісового, сухо степового і пустельного клімату. Аналогічний показник використали Е.Н. Трансо і А. Пенк, які розробили класифікацію клімату, що ґрунтується на співвідношенні опадів і випаровуваності.

Через обмеженість даних спостережень за випаровуванням з водної поверхні велись пошуки емпіричних зв'язків випаровуваності з основними кліматичними факторами. Однією із найбільш ранніх робіт, в яких використовувались дані з дефіциту вологості повітря для характеристики умов зволоження, є робота Е.М. Ольдекопа. Його ідеї заклали початок виникнення цілої групи кліматичних індексів, тобто відношення опадів до певної функції дефіциту вологості повітря.

Значно розповсюдженим при агрокліматичному районуванні виявився коефіцієнт посушливості Н.Н. Іванова, який визначають як частку від ділення величини опадів на випаровуваність, що визначають через температуру і відносну вологість повітря.

Д.І. Шашко вважає кращим показником зволоження відношення опадів до дефіциту вологості повітря, так як ця частка, на його думку, дозволяє об'єктивно і точно характеризувати ступінь зволоженості місцевості. Для низки ряду кліматичних індексів характерне відношення опадів і температур повітря.

Для оцінки умов зволоження Г.Т. Селянінов запропонував таку формулу:

$$ГТК = \frac{x}{0,1 \sum t_{>10}}, \quad (10.1)$$

де  $\sum t_{>10}$  – сума середньодобових температур повітря за період, коли середньодобові температури повітря перевищують 10 °С;

$x$  – сума атмосферних опадів за той же період, мм.

Гідротермічний коефіцієнт (ГТК), на думку І.А. Гольцберга, В.М. Батової, дозволяє легко і досить правильно зробити необхідну для практичних потреб оцінку клімату.

Широкого розповсюдження за кордоном отримали індекси зволоження Ц.В. Тонтвейта, які враховують надлишок і нестачу вологи відносно потреби в ній.

В.П. Попов в своїх агрокліматичних дослідженнях показник зволоження рекомендує обчислювати за формулою:

$$K = \frac{x_0}{E_0}, \quad (10.2)$$

де  $x_0$  – річна величина ефективних опадів, мм (із загальних опадів виключенні випаровування з поверхні ґрунту і поверхневий стік);  
 $E_0$  – випаровуваність червня і липня, розрахована за психрометричною різницею температур повітря, мм.

Принципово новий метод оцінки вологозабезпеченості території у вигляді фізично обґрунтованого індексу сухості запропонував М.І. Будико. В якості показника умов зволоження і теплозабезпеченості він вибрав відношення радіаційного балансу до кількості тепла, необхідного для повного випаровування річної суми опадів

$$K = \frac{R}{Lx}. \quad (10.3)$$

Перелічені індекси зволоження трьох груп враховують середні річні величини або ж, якщо в них і використані місячні значення, то вони об'єднуються в річні. Але для оцінки вологозабезпеченості сільськогосподарських угідь, вегетація яких захоплює відносно невеликі відрізки теплого періоду року, річний показник недостатній. Відображуючи, як правило, атмосферне зволоження і не даючи повного уявлення про динаміку вологозабезпеченості в межах року, вище перелічені критерії, хоча і дозволяють отримувати ряд важливіших відомостей, але в сучасних умовах не можуть бути прямо використані при визначенні розмірів проведення водних меліорацій.

Паралельно з розвитком розглянутих методів вологозабезпеченості рослин, велись пошуки більш досконалих показників, які ґрунтуються на воднобалансових розрахунках. Основи цього напрямку закладені О.М. Костяковим, який запропонував оцінювати ступінь вологозабезпеченості за коефіцієнтом водного балансу:

$$K = \frac{\alpha x}{E_m}, \quad (10.4)$$

де  $\alpha x$  – поглинуті ґрунтом опади, мм;

$E_m$  – сумарне водоспоживання в оптимальних умовах водопостачання рослин, мм.

Недоліком цього співвідношення є трудомісткість у встановленні коефіцієнта  $\alpha$  всередині року, а також використання транспіраційних коефіцієнтів при визначенні сумарного випаровування, які А.М. Алпатьєв вважає «випадковими» і «суто зональними».

Н.В. Бова для районування територій за зволоженістю застосував таке співвідношення:

$$K = \frac{10(W + x)}{\sum t_{>0}}, \quad (10.5)$$

де  $W$  – весняні запаси легкодоступної рослинам вологи в метровому шарі ґрунту, зораною восени під зяб, мм;  
 $x$  – сума опадів у весняно-літній період, мм;  
 $\sum t_{>0}$  – сума температур повітря вище 0 °С.

В останні роки А.Н. Федосєєв в якості показника вологозабезпеченості пасовищної рослинності прийняв інше співвідношення:

$$K = \frac{(W + x)}{\sum d}, \quad (10.6)$$

де  $W$  – весняні запаси доступної вологи в метровому шарі ґрунту, мм;  
 $x$  – сума атмосферних опадів з весни до часу максимального врожаю травостою, мм;  
 $\sum d$  – сума дефіцитів вологості повітря за час випадіння опадів, мм.

Аналогічним показником вологозабезпеченості користувався А.М. Кекух для районування території України.

Використання ґрунтових вологозапасів є позитивним у виразах (10.5) і (10.6), однак недоврахування потреби рослин у волозі робить їх «незамкнутими» з точки зору воднобалансового критерію.

Наявність ґрунтових вологозапасів в якості показника вологозабезпеченості сільськогосподарських угідь використовували Б.А. Шумаков, Г.К. Льгов, С.А. Веріго і Л.А. Разумова та ін.

А.Р. Константинов, Л.І. Сакалі, Н.І. Гойса, Р.Н. Олійник вирішували поставлене завдання шляхом знаходження різниці між необхідним і наявним вмістом вологи в ґрунті.

Необхідно відмітити, що через незначну кількість багаторічних спостережень за ґрунтовими вологозапасами, ці показники в наш час мають обмежені рамки застосування.

С.М. Алпатьєв ступінь вологозабезпеченості оцінював за дефіцитом водоспоживання:

$$M = K \sum d - (\alpha x - W_{гр}), \quad (10.7)$$

де  $M$  – дефіцит водоспоживання (зрошувальна норма нетто), мм;  
 $K \sum d$  – потреба рослин у воді (сумарне водоспоживання рослин), мм;

$\alpha x$  – сума ефективних опадів за розрахунковий період, мм;

$W_{гр}$  – кількість ґрунтових вод, що використовуються рослинами за розрахунковий період, мм;



На відміну від попередніх показників залежність (10.7) виражає ступінь зволоження досліджуваної території в абсолютних величинах.

Аналогічну різницю в якості потреби у зрошенні пасовищ в північних штатах США, використовують Л.Ф. Бартес і Ф.Л. Мілтон, які вважали, що в якості основного показника посушливості краще користуватись різницею опадів і випаровуваності, ніж їх відношенням. Однак різниця між потребою рослин і опадів в окремих районах та в особливості у вологі роки суттєво зменшує ступінь вологозабезпеченості через виключення ґрунтових вологозапасів.

У якості показника зволоження Л.І. Зубенко використовує відношення місячних величин сумарного випаровування до випаровуваності, при цьому ґрунтові вологозапаси визначають розрахунковим шляхом за методом М.І. Будико.

В роботах А.Р. Константинова за показник вологозабезпеченості прийнята різниця випаровуваності і сумарного випаровування при фактичних умовах зволоження

$$\Delta E = E_0 - E. \quad (10.8)$$

Необхідно відмітити, що порівняння сумарного водоспоживання і випаровуваності дозволяє визначити характеристику зволоження, яка здатна показати лише потребу у додатковому зволоженні сільськогосподарських угідь, так як верхньою межею сумарного випаровування є випаровуваність, що витікає із фізичної сутності випаровуваності як максимально можливого випаровування. Вирішення рівняння (10.8) дає в результаті  $\Delta E \geq 0$ . Навіть при надмірному зволоженні знак цієї нерівності не зміниться на зворотний.

Більш досконалими в цьому відношенні можна вважати роботи В.С. Мезенцева, в яких характеристики волого- і теплозабезпеченості виражені в наступній формулі:

$$\beta_x = \frac{kx + W_1 - W_2}{E_m}, \quad (10.9)$$

$$\beta_E = \frac{E}{\alpha E_m}, \quad (10.10)$$

де  $kx$  – сума атмосферних опадів, виправлена на недоврахування їх приборами, мм;

$W_1$  і  $W_2$  – запаси вологи в активному шарі ґрунту на початок і кінець розрахункового періоду;

$E$  – сумарне випаровування в природних умовах зволоження, мм;

$E_m$  – максимально можливе випаровування, мм.

В абсолютних одиницях показники зволоження характеризуються такими рівняннями:

$$\Delta X = E_m - (kx + W_1 - W_2), \quad (10.11)$$

$$\Delta E = aE_m - E, \quad (10.12)$$

де  $\Delta X$  і  $\Delta E$  – дефіцити зволоження і сумарного випаровування, мм;

$a$  – коефіцієнт, який визначають відношенням  $\frac{E}{E_m}$  за умови оп-

тимального водопостачання рослин.

Подальший розвиток відміченого напрямку було здійснене С.І. Харченком, оцінивши ступінь волого- і теплозабезпеченості диспропорцією фактичного і оптимального водоспоживання на основі вирішення рівняння водного балансу кореневмісного шару ґрунту за короткий період (декада, місяць) з врахуванням вологообміну в зоні аерації. У відносних одиницях ступінь зволоження визначають за формулою

$$\eta = \frac{x + W_1 - W_2 + W_{ep} - Y - Y_n}{E_{on}}, \quad (10.13)$$

де  $W_{ep}$  і  $Y$  – витрата і поповнення ґрунтових вод при їх близькому розташуванні від поверхні ґрунту, мм;

$Y_n$  – поверхневий стік, мм;

$E_{on}$  – витрата ґрунтової вологи на сумарне випаровування в умовах оптимального водопостачання рослин, мм.

В абсолютних величинах вологозабезпеченість рослин характеризується дефіцитом водоспоживання

$$\Delta E = (1 - \eta)E_{on} = E_{on} - (x + W_1 - W_2 + W_{ep} - Y - Y_n). \quad (10.14)$$

В практиці оперативного обслуговування сільського господарства протягом ряду років застосовують метод оцінки вологозабезпеченості сільськогосподарських угідь, запропонований А.В. Процеровим. Вологозабезпеченість (%) розраховують як відношення сумарного випаровування з поля при природних умовах зволоження до сумарного випаровування, що спостерігається при оптимальних умовах росту. Для росту сумарного випаровування використовують дані про запаси вологи в метровому шарі ґрунту і атмосферних опадах.

Диспропорція величин водоспоживання в умовах оптимального і природного зволоження є важливим показником умов водопостачан-

ня рослин. Однак ця характеристика враховує лише фізіологічну потребу сільськогосподарських угідь в додатковому зволоженні. На відміну від дефіциту водоспоживання нестача загального зволоження, крім вказаного, включає в себе зміни основних складових рівняння водного балансу в зв'язку з переходом від природних до оптимальних умов зволоження.

В загальному вигляді загальне зволоження можна виразити так:

$$\Delta X = E_m - (kx + W_1 - W_2 + W_{gp}). \quad (10.15)$$

Порівнюючи загальне зволоження і випаровуваність, оцінюють ступінь вологозабезпеченості за Н.В. Данильченком і А.П. Попікіним. Коефіцієнт зволоженості – це відношення наявних ресурсів вологи і випаровуваності за біологічно активний сезон року.

$$K = \frac{\sum x + W_n}{\sum E_0}, \quad (10.16)$$

де  $\sum x$  – сума атмосферних опадів за період квітень-вересень, мм;

$W_n$  – продуктивні запаси вологи в ґрунті на початок квітня, мм;

$\sum E_0$  – сумарна випаровуваність за квітень-вересень, мм.

Н.Г. Грибкова для оцінки вологозабезпеченості степової частини Європейської території взяла показник, що враховує ресурси вологи і потребу рослин у воді використовуючи формулу:

$$K = \frac{W_n + \sum x}{0,65 \sum (E - e)}, \quad (10.17)$$

де  $W_n$  – запас продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту перед посівом, мм;

$\sum x$  – сума опадів за вегетаційний період, мм;

$\sum (E - e)$  – сума середньодобових дефіцитів вологості повітря за вегетаційний період, мм.

Отже, коефіцієнт зволоження може бути визначений за формулою

$$K = \frac{kx + W_1 - W_2 + W_{gp}}{W_m}. \quad (10.18)$$

Легко переконатись, що відношення (10.16) і (10.17) є окремим випадком умови (10.18).

Однак значення тільки дефіцитів зволоження (або коефіцієнтів зволоження) не дозволяє всебічно оцінити зміни основних складових рівняння водного балансу кореневмісного шару в зв'язку з переходом

від природних до оптимальних умов вологозабезпеченості. Дійсно, для того, щоб перейти від природних умов вологозабезпеченості до оптимальних, необхідне сумарне зволоження, відповідно до (10.15), змінити на величину  $\Delta X$ , при цьому слід очікувати значних змін всіх складових рівняння водного балансу і, в першу чергу, сумарного випаровування та стоку. Уміння оцінити зміни цих характеристик дуже важливо при проектуванні гідромеліоративних заходів і призначенні заходів по боротьбі з погіршенням екологічного стану земель.

Теоретично залежність основних характеристик природного зволоження, які одночасно характеризують зміни основних складових рівняння водного балансу в зв'язку з переходом від природних умов зволоження до оптимальних, можна отримати при вирішенні двох рівнянь водного балансу: перше відображує умови оптимальної вологозабезпеченості, друге – природні умови.

Управління водним балансом сільськогосподарського поля при оптимальних умовах вологозабезпеченості можна визначити так:

$$kx_0 + \Delta W_0 + W_{p_0} - E_0 - Y_0 - I_0 + \Delta \Pi_0 = 0, \quad (10.19)$$

де  $kx_0$  – опади, виправлені на недоврахування їх опадомірами;

$\Delta W_0$  – зміни ґрунтових вологозапасів в активному шарі;

$W_{p_0}$  – підживлення ґрунтовими водами кореневмісного шару ґрунту;

$E_0$  – сумарне водоспоживання;

$Y_0$  – стік, що характеризує поверхневий притік і відтік;

$I_0$  – фільтрація поверхневих вод за межі активного шару;

$\Delta \Pi_0$  – зміни поверхневої акумуляції.

Всі складові рівняння водного балансу виражають в мм. Аналогічно буде мати вигляд рівняння водного балансу сільськогосподарського поля при природних умовах вологозабезпеченості:

$$kx + \Delta W + W_p - E - Y - I + \Delta \Pi = 0 \quad (10.20)$$

В рівнянні (3.20) позначення ті ж, що і в (10.19).

Віднявши рівняння (10.19) із (10.20), і різницю

$$(kx_0 + \Delta W_0 + W_{p_0}) - (kx + \Delta W + W_p),$$

що характеризує дефіцит загального зволоження, позначивши через  $\Delta X$ , різницю  $E_0 - E$ , що характеризує дефіцит водоспоживання, позначивши через  $\Delta E$ , отримаємо

$$\Delta X - \Delta E = I_0 - I + Y_0 - Y - \Delta \Pi_0 - \Delta \Pi. \quad (10.21)$$

Алгебраїчну суму правої частини рівняння (10.21) при зрошенні можна оцінити приблизно так: притік і відтік поверхневих вод через наявність каналів зменшуються. Однак таке зменшення призводить до значного підвищення акумуляції стоку на території. Збільшення зосередженого потоку води (період поливу) і збільшення акумуляції приводить до значного збільшення фільтрації – поверхневий стік переходить у внутрішньо ґрунтовий. Звідси сукупність членів правої частини рівняння (10.21) зручніше характеризувати зміною сумарного стоку зі зрошуваної території –  $\Delta I$ , тоді воно має вигляд

$$\Delta X = \Delta E + \Delta I. \quad (10.22)$$

В оптимальних умовах зволоження  $\Delta X \rightarrow 0$ ,  $\Delta E \rightarrow 0$ ,  $\Delta I \rightarrow 0$ . В умовах недостатньої вологозабезпеченості  $\Delta X > 0$ ,  $\Delta E > 0$ ,  $\Delta I > 0$ , верхньою теоретичною межею досліджуваних дефіцитів (повна відсутність зволоження) є  $\Delta X \rightarrow E_m$ ,  $\Delta E \rightarrow \alpha E_m$ ,  $\Delta I \rightarrow (1 - \alpha)E_m$ .

При надмірному зволоженні, коли  $\Delta X < 0$ ,  $\Delta E < 0$ ,  $\Delta I < 0$ , умова оптимальної вологозабезпеченості може бути достатньо зниженим притоком або збільшенням відтоку атмосферних вод з території, можливі зміни в обох вказаних напрямках.

Рівняння (10.22), є теоретично обґрунтованим, показує, що підйом рівня ґрунтових вод в умовах зрошення може відбуватись не тільки за рахунок надмірних зрошувальних норм і фільтрації води із каналів. Хоча відмічене і служить головною причиною погіршення меліоративного стану земель, не менше важливо враховувати зміни основних складових рівняння водного балансу (і в першу чергу сумарного відтоку) при зміні умов зволоження.

Цікаві дані, що характеризують збільшення сумарного стоку зі зрошуваних територій, наводить Л.В. Дунін-Барковський. Так, в результаті наміченого збільшення площі зрошення в басейні р. Сирдар'я (Узбекистан), в 50-х рр. минулого століття прогнозувався дефіцит водозабезпеченості в літні місяці в розмірі 60-75 %. Однак, незважаючи на те, що розвиток зрошення було здійснено, зниження водозабезпеченості не спостерігали. Аналізуючи при цьому багаторічні дані стоку р. Сирдар'ї, Л.В. Дунін-Барковський приходить до висновку, що збільшення зрошуваних площ і забір води на зрошення зменшує стік не пропорційно збільшенню водозабору. Однією із головних причин такого положення він вважає води, що втрачаються на фільтрацію із каналів і просочилися нижче кореневмісного шару, які можуть повертатись у джерело зрошення.

Дійсно, при зрошенні акумулюючої ємкості кореневмісного шару ґрунтів у окремі моменти може виявитись недостатньою для утримання надлишкових вод, і в цьому випадку необхідно застосовувати заходи з прискорення відтоку внутрішньогрунтових вод шляхом влаштування дренажу. В цьому зв'язку рівняння (10.22) за різницею нестачі зволоження і дефіцитів сумарного випаровування дозволяє, в першому наближенні, оцінити об'єм надлишкових вод (без врахування фільтрації води із каналів і надлишкових зрошувальних вод), скид яких необхідно передбачати зі зрошуваної території.

Узагальнюючи вищевикладене, можна відмітити, що сукупність характеристик зволоження, взаємозв'язок яких обумовлений рівнянням (10.22), має перевагу перед раніше розглянутими при вирішенні питання про напрямок і розміри водних меліорацій.

Закінчуючи розгляд існуючих характеристик зволоження, необхідно відмітити ще напрямок у досліджуваному питанні, розпочатому П.І. Броуновим, який ступінь зволоженості оцінював за вірогідності настання посушливих декад (декади з опадами менше 5 мм).

В.В. Шабанов розробив метод оцінки потреби в меліорації, при цьому вологозабезпеченість рослин оцінював за ступенем вірогідності настання неоптимальних умов. До кількості зовнішніх факторів розвитку рослин він, крім ґрунтових вологозапасів, відніс температуру ґрунту. Попередньо уяснивши закон розподілу ґрунтових вологозапасів і температури ґрунту, вчений навів значення вірогідності настання і ненастання (подекадно) оптимальних умов вологозабезпеченості, а також розміри диспропорції тепла і вологи для 22 метеостанцій Європейської території (зона сухих степів зайнята не була). Розроблений метод визначення потреби у водних меліораціях є теоретично обґрунтованим і досить перспективним. Однак відсутність надійних даних на досліджуваній території за основними факторами зовнішнього середовища рослин (в першу чергу, ґрунтових вологозапасів) ускладнює його використання при масових розрахунках.

При оцінюванні вологозабезпеченості досліджуваної території для визначення об'ємів гідромеліорації доцільно встановити два показники – дефіцити зволоженості і водозабезпеченості, різницю між якими визначає третій член рівняння (10.22). Для вирішення поставленої задачі можна було б використовувати рівняння водного балансу (10.19) і (10.20), однак невелика кількість даних по основних складових цих рівнянь як для незрошуваних, так і для зрошуваних територій диктує необхідність використання розрахункових методів. В цьому

зв'язку необхідно зупинитись на основних розрахункових методах визначення складових частин характеристик зволоженості: потреби рослин у воді, сумарного випаровування і ґрунтових вологозапасів.

Проведений аналіз методів прогнозування показників, що обумовлюють потребу у водних меліораціях дозволяє зробити такі висновки:

- 1) узагальненими кількісними характеристиками волого- і теплозабезпеченості агроландшафтів є дефіцити зволоження і водоспоживання. Ці характеристики взаємопов'язані і доповнюють один одного;
- 2) дефіцити зволоження і водоспоживання можуть бути використані при визначенні розмірів площі водних меліорацій, а також дозволяють в першому наближенні оцінити ті зміни в основних складових рівняння водного балансу, які відбудуться в зв'язку з переходом від природних умов вологозабезпеченості до оптимальних;
- 3) недостатня вивченість складових рівняння водного балансу сільськогосподарських угідь на досліджуваній території диктує необхідність застосування розрахункових методів для їх кількісного визначення;
- 4) при визначенні основних складових рівнянь водного балансу (сумарного випаровування, ґрунтових вологозапасів, стоку) в середньо багаторічному розділі прийнятним необхідно вважати метод В.С. Мезенцева, але тільки з врахуванням стану і складу культур.

Коливання елементів режиму зрошення (зрошувальної норми, кількості та строків поливів) із року в рік обумовлені впливом великої кількості факторів, в особливості погодних, що визначає необхідність при вивченні цих коливань застосовувати методи математичної статистики.

В основу водозабезпеченості зрошувальної системи покладено вимоги ДБН В.2.4-1-99 про те, що проєктні параметри її повинні забезпечувати своєчасну подачу води на зрошувані землі в кількості, яка гарантує отримання 90 % середньорічної продукції рослинництва за не менше ніж 20-річний період спостережень при повному задоволенні потреби рослин у воді кожного року та забезпеченні оптимальних умов агротехніки. При цьому зниження об'єму продукції в гостро посушливі роки 95 %-ї забезпеченості за питомими витратами дозволяється не більше ніж на 10 % від запланованого рівня продукції.

Отже, необхідно розраховувати режими зрошення таким чином, і для таких років щоб задовольнити ці вимоги. При цьому єдиних вимог щодо розрахунків та вибору року заданої забезпеченості немає. Існує декілька рекомендацій, що дозволяють в тій чи іншій мірі вирішити це завдання.

Для проектування зрошувальної мережі в меліоративній практиці, як правило, розраховують режим зрошення для середньосухого року 75 %-ї забезпеченості, рідше для гостро посушливого року на 95 % забезпеченості. Для проектування систем краплинного зрошення, рекомендується вести розрахунок режиму зрошення 85 %-ї забезпеченості, а для складання довгострокового прогнозу підйому рівня ґрунтових вод краще вести розрахунки на середній за зволоженістю рік ( $p=50\%$ ).

## 10.2. Вибір року заданої забезпеченості за атмосферними опадами

Атмосферні опади в зрошуваній зоні України є основним компонентом формування ґрунтової вологи зони аерації, тому для попередніх оцінок зволоженості року можна використовувати тільки їх.

З цією метою беруть ряд спостережень за атмосферними опадами не менше 20 років і визначають їх суму за вегетаційний період. Потім отримані суми за кожен рік розміщують в спадаючому порядку, так як вважають, що чим менша кількість опадів випала за вегетацію тим сухіше був рік.

Для кожного члена отриманого ряду знаходять забезпеченість за формулою

$$p = \frac{m}{n+1} 100\%, \quad (10.23)$$

де  $p$  – забезпеченість кожного року, %;

$m$  – порядковий номер в розрахунковому ряду;

$n$  – кількість членів ряду.

Той рік, що має забезпеченість найближчу до розрахункової вважають модельним. Однак, кожен рік має специфічний внутрішньорічний розподіл опадів нехарактерний для інших. Рік з великими бездошовими періодами та один-два великих дощі може прирівнюватись до року, в якому рівномірно випадали дощі протягом всієї вегетації, хоча зволоженість території в таких умовах буде різною. Тому для виключення особливостей окремих років, рекомендують брати не один, а декілька



років із групи найближчих до розрахункової забезпеченості і осереднювати їх метеорологічні дані для розрахунку режиму зрошення.

Недоліком цього методу є те, що не тільки атмосферні опади впливають на зволоженість території, а й інші агрометеорологічні фактори, які тут не враховуються. Однак, через простоту розрахунків його іноді використовують для техніко-економічних співставлень варіантів проєктів.

**Вправа 10.1. Вибрати рік 75 %-вої забезпеченості за атмосферними опадами за багаторічними даними метеостанції Синельникове**

Дано: Атмосферні опади за вегетаційний період (квітень-вересень) за 2000-2022 рр.

Розв'язок

Всі розрахунки зведені в табл. 10.1.

**Таблиця 10.1 – Визначення року-моделі за атмосферними опадами**

№ з/п	Рік	Атмосферні опади, мм	В спадаючому порядку		p, %
			рік	опади	
1	2000	272,3	2021	428,0	4,2
2	2001	290,0	214	422,7	8,3
3	2002	350,5	2004	386,6	12,5
4	2003	338,5	2012	382,8	16,7
5	2004	386,6	2002	350,5	20,8
6	2005	185,1	2003	338,5	25,0
7	2006	338,2	2006	388,2	29,2
8	2007	217,5	2015	323,4	33,3
9	2008	286,0	2019	310,6	37,5
10	2009	199,6	2011	303,4	41,7
11	2010	299,1	2010	299,1	45,8
12	2011	303,4	2001	290,0	50,0
13	2012	382,8	2008	286,0	54,2
14	2013	243,6	2016	277,1	58,3
15	2014	422,7	2000	272,3	62,5
16	2015	323,4	2017	245,5	66,7
17	2016	277,1	2013	243,6	70,8
18	2017	245,5	2022	226,3	75,0
19	2018	213,3	2007	217,5	79,2
20	2019	310,6	2018	213,3	83,3
21	2020	213,0	2020	213,0	87,5
22	2021	428,0	2009	199,6	91,7
23	2022	226,3	2005	185,1	95,8

За кожен рік спостережень визначають суму атмосферних опадів за вегетаційний період і записують у відповідну графу табл. 10.1. Потім суми атмосферних опадів за вегетацію розташовують в спадаючому порядку, і визначають забезпеченість року за формулою (10.23). Рік забезпеченість атмосферних опадів якого в ранжированому ряду буде найближче до 75 %-вої можна вважати за рік-

модель. В даному випадку це буде 2022 рік. Сума опадів за вегетацію відповідно складе 226,3 мм.

Для виключення нехарактерних особливостей конкретних років необхідно осереднити метеорологічні величини за декілька років з близькою забезпеченістю. В даному випадку можна осереднити дані за 2017, 2013, 2022, 2007 та 2018 роки.

### **10.3. Вибір року заданої забезпеченості за комплексним кліматичним показником**

Методика вибору року заданої забезпеченості за комплексним кліматичним показником (ККП) запропонована в методичних рекомендаціях (Методичні вказівки ... 1993). Цей метод розробляли для лісової зони (зони осушення) України для проектування осушувальних та осушувально-зволожувальних систем, але з достатньою для практичних розрахунків точністю його можна застосовувати і для розрахунків режимів зрошення характерних за зволоженістю років. На відміну від попереднього методу для оцінки зволоженості враховують крім опадів й інші метеорологічні фактори.

Метеорологічні фактори такі, як атмосферні опади, температура, дефіцит та відносна вологість повітря змінюються як в багаторічному розрізі, так і протягом періоду вегетації, тому доцільно отримувати їх узагальнену характеристику за періодами вегетації, характерних за умовами зволоженості років. При статистичних дослідженнях метеорологічного режиму вважають, що періодичний ряд спостережень є реалізацією випадкового процесу, який відображає характерні зміни однієї або декількох метеорологічних величин одночасно. Суть кліматичної обробки, при цьому, полягає в тому, щоб на підставі аналізу періодичного ряду отримати основні ймовірнісні закономірності для процесу в цілому.

Для розв'язання поставленого завдання необхідно сформувати статистичні ряди із сум атмосферних опадів за вегетаційний період ( $\sum P$ ) і середніх температур ( $t$ ), дефіцитів ( $d$ ) та відносної вологості повітря ( $a$ ). Оскільки кліматичні умови характеризуються не якоюсь конкретною метеорологічною величиною, а їх сукупністю, тому при розв'язанні поставленого завдання обробки кліматичної інформації велику увагу необхідно приділяти дослідженню різних систем метеорологічних величин, або так званим метеорологічним комплексам.

Прикладами таких систем є двовимірні комплекси: температура-вологість, температура-опади, випаровування-опади та ін.

В даному випадку розробники рекомендують розглядати такі метеорологічні комплекси (Методичні вказівки ... 1993):

- індекс посушливості (ІП), який пов'язує між собою випаровуваність та атмосферні опади

$$ІП = \frac{\sum E_0}{\sum P}, \quad (10.24)$$

де  $\sum P$  – сума атмосферних опадів за вегетацію;

$\sum E_0$  – сума випаровуваності за той же період, яку визначають за формулою М.М. Іванова.

- гідротермічний коефіцієнт прибутку (ГТКП), який пов'язує між собою атмосферні опади та температуру повітря, і розраховується за формулою

$$ГТКП = \frac{\sum P}{\sum t}, \quad (10.25)$$

де  $\sum t$  – сума середньодобових температура повітря за вегетацію.

- гідротермічний коефіцієнт витрат (ГТКВ), який пов'язує між собою випаровуваність та температуру повітря, і розраховується за формулою

$$ГТКВ = \frac{\sum E_0}{\sum t}. \quad (10.26)$$

Крім наведених метеорологічних комплексів можуть застосовуватись й інші, наприклад, будь-які коефіцієнти зволоженості території наведені в п. 10.1.

Для подальших розрахунків всі статистичні ряди метеорологічних величин та комплексів розташовують в спадаючому (атмосферні опади, відносну вологість повітря, гідротермічний коефіцієнт прибутку) та зростаючому порядку (температуру та дефіцит вологості повітря, гідротермічний коефіцієнт витрат та індекс посушливості).

З достатньою для інженерних розрахунків точністю використання воднобалансових розрахунків доцільно розділити статистичні ряди за вірогідністю перевищення (забезпеченості) із середніх значень за вегетацію по метеорологічних факторах та комплексах на п'ять характерних за умовами зволоження груп:

- 0-20 % – дуже вологий;

- 20-40 % – вологий;
- 40-60 % – середній;
- 60-80 % – сухий;
- 80-100 % – дуже сухий.

Такий підхід є правомірним тому, що маючи статистичні ряди з обмеженими об'ємами вибірки (як правило, не більше 30-50 років спостережень), однакові або близькі за вегетацію значення членів ряду характеризуються різними значеннями за забезпеченістю, які часто суттєво відрізняються між собою.

При наявності 50 членів ряду, його можна розділити на більшу кількість груп зволоженості, наприклад, 7 чи 10.

- 0-10 % – дуже вологий;
- 10-20 – вологий;
- 20-30 – вологий
- 30-40 – середньовологий;
- 40-50 – середній;
- 50-60 – середній;
- 60-70 – середньосухий;
- 70-80 – посушливий;
- 80-90 – сухий;
- 90-100 – дуже сухий.

В умовах реального року всі метеорологічні фактори та комплекси в сформованих статистичних рядах характеризуються різною величиною забезпеченості, що вказує на складний характер їх формування.

Для комплексної характеристики кліматичних умов протягом періоду вегетації запропонований комплексний кліматичний показник (ККП), який дозволяє враховувати характер формування всіх розглянутих метеофакторів та сформованих на їх підставі метеокомплексів, в умовах розглянутого періоду. ККП розраховують за формулою

$$ККП = 1 - \frac{\sum m}{L \cdot n}, \quad (10.27)$$

де  $\sum m$  – сума місць, що займають метеофактори й метеорологічні комплекси в приведених до порівняльного огляду статистичних рядів для кожного із розглянутих років спостережень;

$L$  – кількість метеорологічних факторів й комплексів, що оцінюються;

$n$  – кількість членів статистичного ряду (кількість років спостережень).

З отриманих значень за ККП формується статистичний ряд за розглянутими роками спостережень, для якого визначають статистичні показники.

За даними ККП виконують розподіл періодів вегетації багаторічного ряду спостережень, який розподіляється на характерні за зволоженістю групи з різною кількістю членів в кожній з груп.

Типовий розподіл метеорологічних факторів в характерні за умовами зволоження періоди вегетації отримують шляхом осереднення за певні періоди (декади) за реальні роки спостережень, що знаходяться в тій чи іншій групі.

Отриманий таким чином розподіл атмосферних опадів, температури, дефіцитів чи відносної вологості повітря, відображають дуже близькі до реальних умов характер мінливості в дуже вологий, вологий, середній, сухий чи дуже сухий рік.

Недоліком цього методу, як і для попереднього, є невідповідність періоду вегетації різних культур при визначенні режимів зрошення для сівозмін, що містять різні культури.

При виборі року моделі крім перелічених метеорологічних величин і комплексів можна застосовувати й інші. Наприклад, випаровуваність за вегетацію, запаси вологи за вегетацію або критичний період в різних шарах ґрунту та ін.

### **Вправа 10.2. Встановити типовий розподіл метеофакторів для сухого року за ККП**

Дано: Подекадні метеорологічні дані за МС Синельниково за 2000-2022 роки.

#### Розв'язання

Визначення типового розподілу метеорологічних факторів для будь якого року за зволоженістю за ККП здійснюють в такій послідовності.

1. Необхідно підрахувати суми атмосферних опадів, середні температуру, дефіцит та відносну вологість за вегетаційний період (04-09 місяці) кожного розглянутого року (табл. 10.2).

У випадку, якщо не буде відомостей про дефіцит, або відносну вологість повітря, пов'язаних між собою через температуру, можна скористатись формулами (5.37), (9.10) і розрахувати відсутній фактор.

2. За формулами (10.24) – (10.26) розраховують метеорологічні комплекси для кожного року і записують їх в табл.10.2.

**Таблиця 10.2 – Статистичний ряд спостережень за метеорологічними факторами та метеорологічними комплексами за багаторічний період спостережень (МС Синельникове)**

№	Рік	$\Sigma P$ , мм	$d$ , мб	$t$ , °С	$a$ , %	$E_0$ , мм	III	ГТКП	ГТКВ
1	2000	272	9,2	17,2	52,9	906	3,33	0,086	0,288
2	2001	290	9,5	17,2	51,1	939	3,24	0,092	0,298
3	2002	351	10,2	17,9	50,2	990	2,83	0,107	0,302
4	2003	339	8,4	16,6	55,4	835	2,47	0,111	0,275
5	2004	387	6,6	16,1	63,9	659	1,70	0,131	0,224
6	2005	185	9,3	18	54,4	910	4,91	0,056	0,276
7	2006	338	8,7	17,5	56,0	859	2,54	0,106	0,268
8	2007	218	12	18,7	44,1	1152	5,30	0,064	0,337
9	2008	286	9,1	17,5	54,4	891	3,11	0,089	0,278
10	2009	200	9,7	17,6	51,6	950	4,76	0,062	0,295
11	2010	299	12	19,7	47,3	1135	3,79	0,083	0,315
12	2011	303	9,6	18	53,1	936	3,09	0,092	0,284
13	2012	383	11,5	20	50,4	1083	2,83	0,105	0,296
14	2013	244	9,8	18,4	53,6	946	3,88	0,072	0,281
15	2014	423	9,1	18,1	56,0	882	2,09	0,128	0,266
16	2015	323	10,3	18,4	50,7	1001	3,09	0,096	0,297
17	2016	277	9,3	18,5	56,1	898	3,24	0,082	0,265
18	2017	246	11,0	18,6	48,4	1057	4,31	0,072	0,311
19	2018	213	12,3	19,6	45,7	1165	5,46	0,060	0,325
20	2019	311	10,7	18,4	49,0	1039	3,35	0,092	0,309
21	2020	213	11,3	18,1	46,6	1083	5,08	0,064	0,327
22	2021	428	7,2	17,2	63,3	706	1,65	0,136	0,224
23	2022	226	9,8	18,3	53,1	950	4,20	0,067	0,284

**Примітка:**  $\Sigma P$  – сума атмосферних опадів за вегетацію, мм;  $d$  – середній дефіцит вологості повітря за вегетацію, мб;  $t$  – середня за вегетацію температура повітря, °С;  $a$  – середня за вегетацію вологість повітря, %;  $E_0$  – випаровуваність за вегетацію, мм; III – індекс посушливості; ГТКП – гідротермічний коефіцієнт прибутку; ГТКВ – гідротермічний коефіцієнт витрат.

- Всі статистичні ряди метеорологічних факторів та комплексів розташовують в спадаючому (атмосферні опади, відносну вологість повітря, гідротермічний коефіцієнт прибутку) та зростаючому порядку (температуру та дефіцит вологості повітря, гідротермічний коефіцієнт витрати, індекс посушливості) (табл.10.3).
- За даними табл. 10.3 розраховують ККП за формулою (10.27) і записують його в табл. 10.4.
- З отриманих значень ККП формують статистичний ряд (табл. 10.4), який розташовують в спадаючому порядку.
- За цим статистичним рядом знаходять амплітуду варіювання ККП ( $A$ ) за формулою

$$A = KKP_{\max} - KKP_{\min}, \quad (10.28)$$

де  $KKP_{\max}$  та  $KKP_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення ККП.

В даному випадку  $A = 0,932 - 0,056 = 0,876$ .

Таблиця 10.3 – Статистична обробка основних метеорологічних факторів та розрахунків на їх основі комплексів

№ з/п	В спадаючому порядку						В зростаючому порядку							
	рік	$\Sigma P$	рік	$a$	рік	ГТКП	рік	$t$	$d$	рік	III	рік	ГТКВ	
1	2021	428	2004	63,9	2021	0,136	2004	16,1	2004	6,6	2021	1,65	2004	0,224
2	2014	423	2021	63,3	2004	0,131	2003	16,6	2021	7,2	2004	1,70	2021	0,224
3	2004	387	2016	56,1	2014	0,128	2000	17,2	2003	8,4	2014	2,09	2016	0,265
4	2012	383	2006	56,0	2003	0,112	2001	17,2	2006	8,7	2003	2,46	2014	0,266
5	2002	350	2014	56,0	2002	0,107	2021	17,2	2008	9,1	2006	2,54	206	0,268
6	2003	338	2003	55,4	2006	0,106	2006	17,5	2014	9,1	2002	2,82	2003	0,275
7	2006	338	2005	54,4	2012	0,105	2008	17,5	2000	9,2	2012	2,83	2005	0,276
8	2015	323	2008	54,4	2015	0,096	2009	17,6	2005	9,3	2011	3,09	2008	0,278
9	2019	311	2013	53,6	2019	0,092	2002	17,9	2016	9,3	2015	3,10	2013	0,281
10	2011	303	2011	53,1	2001	0,092	2005	18,0	2001	9,5	2008	3,12	2022	0,284
11	2010	299	2022	53,1	2011	0,092	2011	18,0	2011	9,6	2001	3,24	2011	0,284
12	2001	290	2000	52,9	2008	0,089	2014	18,1	2009	9,7	2016	3,24	2000	0,288
13	2008	286	2009	51,6	2000	0,086	2020	18,1	2013	9,8	2000	3,33	2009	0,295
14	2016	277	2001	51,1	2010	0,083	2022	18,3	2022	9,8	2019	3,34	2012	0,296
15	2000	272	2015	50,7	2016	0,082	2013	18,4	2002	10,2	2010	3,80	2015	0,297
16	2017	246	2012	50,4	2013	0,072	2015	18,4	2015	10,3	2013	3,88	2001	0,298
17	2013	244	2002	50,2	2017	0,072	2019	18,4	2019	10,7	2022	4,20	2002	0,302
18	2022	226	2019	49,0	2022	0,067	2016	18,5	2017	11,0	2017	4,30	2019	0,309
19	2007	218	2017	48,4	2020	0,064	2017	18,6	2020	11,3	2009	4,75	2017	0,311
20	2018	213	2010	47,3	2007	0,064	2007	18,7	2012	11,5	2005	4,92	2010	0,315
21	2020	213	2020	46,6	2009	0,062	2018	19,6	2007	12,0	2020	5,08	2018	0,325
22	2009	200	2018	45,7	2018	0,059	2010	19,7	2010	12,0	2007	5,28	2020	0,327
23	2005	185	2007	44,1	2005	0,056	2012	20,0	2018	12,3	2018	5,47	2007	0,337

7. Визначають величину переходу (відстань) від однієї зволоженості до іншої  $\Delta$ , за виразом  $\Delta = \frac{A}{5}$ , тобто  $\Delta = \frac{0,876}{5} = 0,1752$ .

Далі в статистичному ряду знаходять межі зміни ККП. Так, розглядаючи ККП в статистичному ряду,

від 0,932 до 0,7568 будуть знаходитись вологі роки,

від 0,7568 до 0,5816 – середньовологі,

від 0,5816 до 0,4064 – середні,

від 0,4064 до 0,2312 – середньосухі,

від 0,2312 до 0,056 – посушливу роки.

Отже, в результаті статистичного розрахунку отриманий цілий ряд років (1972, 2009, 1966, 1979, 1963, 1994, 2010, 1986, 2017, 1967 роки), які за своїми метеорологічними факторами та комплексами найбільше підходять до сухого року, близького до 75 %-ної забезпеченості, тобто тієї забезпеченості, яка потрібна для складання режиму зрошення при проєктуванні зрошувальних систем.

**Таблиця 10.4 – Комплексний кліматичний показник (ККП) та його статистична обробка**

№ з/п	Рік	ККП	В спадаючому порядку		Зволоженість	р, %
			рік	ККП		
1	2000	0,534	2004	0,932	Вологі	4,2
2	2001	0,522	2021	0,913		8,3
3	2002	0,540	2003	0,807		12,5
4	2003	0,807	2014	0,783		16,7
5	2004	0,932	2006	0,770		20,8
6	2005	0,391	2008	0,609	Середньовологі	25,0
7	2006	0,770	2011	0,553	Середні	29,2
8	2007	0,081	2002	0,540		33,3
9	2008	0,609	2016	0,540		37,5
10	2009	0,329	2000	0,534		41,7
11	2010	0,230	2001	0,522		45,8
12	2011	0,553	2015	0,460		50,0
13	2012	0,435	2012	0,435		54,2
14	2013	0,410	2013	0,410		58,3
15	2014	0,783	2005	0,391	Середньосухі	62,5
16	2015	0,460	2019	0,366		66,7
17	2016	0,540	2022	0,366		70,8
18	2017	0,217	2009	0,329		75,0
19	2018	0,056	2010	0,230	Посушливі	79,2
20	2019	0,366	2017	0,217		83,3
21	2020	0,155	2020	0,155		87,5
22	2021	0,913	2007	0,081		91,7
23	2022	0,366	2018	0,056		95,8

8. Осереднені метеорологічні фактори за відповідні декади цих років (атмосферні опади, температура та дефіцит вологості повітря) і будуть характерними для року-моделі. За вибраним роком-моделлю розраховують режим зрошення всіх сільськогосподарських культур цієї сізовміни, який застосовують в подальшому при проектуванні зрошувальної та дренажно-скидної мереж.

#### **10.4. Вибір року заданої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання сільськогосподарських культур методом реального року**

Вибір року заданої забезпеченості здійснюють за ретроспективним рядом спостережень за багаторічний період з урахуванням проектного складу сільськогосподарських культур. За цими роками визначають дефіцити водоспоживання та продуктивність сільськогосподарських культур при різних рівнях подачі води в систему для покриття створених дефіцитів за розглянутий ряд.

Дефіцити водоспоживання сільськогосподарських культур розраховують для кожного року за яким є метеорологічні дані, використо-



вучи один із розглянутих раніше методів. При цьому тривалість ряду спостережень повинна бути не менше 20 років.

Вибір року для сівозміни з  $N$  культур виконують в такій послідовності:

- для кожного поля, що входить в розрахункову сівозміну, знаходять дефіцит водоспоживання за кожен рік для основної та поживної культури;
- знаходять для кожного року середньовиважений дефіцит водоспоживання для сівозміни в цілому за формулою

$$D_{civ} = \frac{D_1 F_1 + D_2 F_2 + \dots + D_n F_n}{F_{civ}}, \quad (10.29)$$

де  $D_{civ}$  – середньовиважений дефіцит водоспоживання для розрахункової сівозміни за конкретний рік;

$D_1, D_2, \dots, D_n$  – дефіцит водоспоживання для основної та поживної культури на 1-му, 2-му, ...,  $n$ -му полях;

$F_1, F_2, \dots, F_n$  – зрошувана площа кожного поля сівозміни;

$F_{civ}$  – зрошувана площа сівозміни.

- розташовують значення щорічних середньовиважених дефіцитів водоспоживання в зростаючому порядку і знаходять забезпеченість за формулою (10.23);
- знаходять рік, за який середньовиважений дефіцит водоспоживання має задану або близьку до неї забезпеченість.

Застосування одного року як модельного не зовсім доцільно, так як в більшості випадків вибраний рік має специфічні особливості ходу метеофакторів які не є характерними для інших років. Тому для встановлення більш узагальнених метеорологічних факторів модельного року необхідно підбирати декілька років, які в статистичному ряду найближче розташовані до зазначеної забезпеченості. Осереднені метеорологічні фактори за відповідні декади цих років і будуть характерними для року-моделі.

### **Вправа 10.3. Вибрати рік 75 %-вої забезпеченості для сівозміни за багаторічними даними МС Синельникове**

Дано: 1. Подекадні метеорологічні дані спостережень за 2000–2022 роки.

2. Сівозміна:

1, 2 – багаторічні трави,

3 – пшениця озима,

4 – пшениця озима + поживна кукурудза на зелений корм,

- 5 – кукурудза на зерно,
  - 6 – кукурудза на силос,
  - 7 – озима пшениця + літній посів багаторічних трав.
3. Зрошувана площа сівозміни – 490 га.

#### Розв'язання

Вибір року заданої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання проводять в такій послідовності.

1. Встановлюють за якими сільськогосподарськими культурами необхідно розраховувати дефіцити водоспоживання та площу, яку вони займають. Для даного прикладу необхідно знайти дефіцит водоспоживання за: багаторічними травами – 2 поля, пшеницею озимою – 3 поля, кукурудзою на зерно – 1 поле, кукурудзою на силос – 1 поле, кукурудзою на зелений корм поживно – 1 поле, літнім посівом багаторічних трав – 1 поле.

У зв'язку з тим, що площа всіх полів повинна бути приблизно однаковою і до того ж кожна культура на кожному полі висівається щонайменше 1 раз на 7 років, тому можна вважати, в даному випадку, що площа кожного поля однакова і становить 70 га.

2. Встановлюють дату посіву (поновлення вегетації). Для цього залежно від культури необхідно встановити температуру ( $t_{noc}$ ), при якій можна здійснювати посів (при якій поновлюється вегетація у озимих та багаторічних сільськогосподарських культурах). Так, для озимих, ранніх ярових та багаторічних трав  $t_{noc} = +5$  °C, для буряків (цукрових, кормових та столових)  $t_{noc} = +7$  °C, для овочів  $t_{noc} = +12$  °C, для кукурудзи  $t_{noc} = +13$  °C. За метеорологічними даними для кожного року встановлюють декаду, середня температура повітря в якій складає, або перевершує температуру  $t_{noc}$ , перший день цієї декади приймають за початок вегетації культури.

Наприклад: для кукурудзи температура  $t_{noc} = +13$  °C, за метеорологічними даними середньодекадна температура повітря в 2019 році перевищує 13 °C в третій декаді квітня, це означає, що початок вегетації можна прийняти – 21.04.

3. Для кожного року за кожною з культур прийнятої сівозміни розраховують сумарний дефіцит водоспоживання за одним із наведених в розділі 9 методом (наприклад біокліматичним методом А.М. та С.М. Алпатьєвих). Дані розрахунків записують в табл. 10.5. За формулою (10.29) розраховують середньовиважений дефіцит водоспоживання для сівозміни ( $\sum D_{civ}$ ) для кожного року ряду спостережень.
4. Для визначення емпіричної забезпеченості кожного року, необхідно весь отриманий розрахунковий ряд спостережень за  $\sum D_{civ}$  розмістити в зростаючому порядку, як показано в табл. 10.6 і для кожного члену цього ряду за формулою (10.23) знайти його забезпеченість.

**Таблиця 10.5 – Сумарний дефіцит водоспоживання розрахункової сівозміни (мм) за багаторічний період спостережень (МС Синельникове)**

Рік	Сільськогосподарські культури сівозміни						Середньовиважений дефіцит водоспоживання
	Багаторічні трави 2-3-го року	Пшениця озима	Кукурудза на зерно	Кукурудза на силос	Кукурудза на з/к (поживно)	Літній посів люцерни	
2000	498	234	218	168	131	137	336
2001	490	117	234	176	279	278	328
2002	473	197	176	163	117	128	303
2003	380	265	104	142	118	124	292
2004	215	129	39	67	43	55	146
2005	531	159	196	152	280	266	348
2006	380	124	192	159	131	139	251
2007	645	295	274	227	200	212	441
2008	421	91	256	172	205	220	281
2009	514	180	252	216	142	146	332
2010	548	153	167	83	318	311	348
2011	453	227	149	103	220	218	325
2012	478	218	159	140	165	168	320
2013	501	228	198	170	133	140	333
2014	410	129	121	53	210	208	257
2015	444	118	198	147	280	284	307
2016	441	41	180	125	217	214	249
2017	546	203	247	186	273	277	383
2018	638	230	216	221	274	289	424
2019	512	178	173	205	145	155	320
2020	568	113	299	243	291	302	373
2021	241	110	17	24	135	142	161
2022	507	178	213	211	139	145	322

- При виборі року-моделі в табл. 10.6 знаходять такий рік, який найближче підходив би до розрахункової забезпеченості. В даному випадку найбільш близьким роком до 75 %-вої забезпеченості є 2005 рік. Отже, цей рік можна прийняти за рік-модель для середньосухих років.
- Застосування одного року як модельного не зовсім доцільно, так як в більшості випадків вибраний рік має специфічні особливості ходу метеорологічних факторів, які не є характерними для інших років. Тому, для встановлення ходу метеорологічних факторів модельного року необхідно підбирати декілька років, які в статистичному ряду найближче розташовані до заданої забезпеченості.

**Таблиця 10.6 – Середньовиважений дефіцит водоспоживання ( $\sum D_{civ}$ ) та визначення року заданої забезпеченості**

№	Рік	Середньовиважений дефіцит водоспоживання сівозміни	В наростаючому порядку		р, %
			рік	дефіцит	
1	2000	336	2004	146	4,2
2	2001	328	2021	161	8,3
3	2002	303	2016	249	12,5
4	2003	292	2006	251	16,7
5	2004	146	2014	257	20,8
6	2005	348	2008	281	25,0
7	2006	251	2003	292	29,2
8	2007	441	2002	303	33,3
9	2008	281	2015	307	37,5
10	2009	332	2012	320	41,7
11	2010	348	2019	320	45,8
12	2011	325	2022	322	50,0
13	2012	320	2011	325	54,2
14	2013	333	2001	328	58,3
15	2014	257	2009	332	52,5
16	2015	307	2013	333	66,7
17	2016	249	2000	336	70,8
18	2017	383	2005	348	75,0
19	2018	424	2010	348	79,2
20	2019	320	2020	373	83,3
21	2020	373	2017	383	87,5
22	2021	161	2018	424	91,7
23	2022	322	2007	441	95,8

В даній вправі для забезпеченості 75 % (середньосухий рік) такими є 2013, 2000, 2005, 2010, та 2020 роки. Осереднені метеорологічні фактори за відповідні декади цих років (атмосферні опади, температура та дефіцит вологості повітря) і будуть характерними для року-моделі.

Для становлення року-моделі заданої забезпеченості можна застосувати зволоженість року як показано у вправі 10.2.

7. За вибраним роком-моделлю розраховують режим зрошення всіх сільськогосподарських культур цієї сівозміни, який застосовують в подальшому при проектуванні зрошувальної та дренажно-скидної мереж.

### **10.5. Вибір року заданої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання сільськогосподарських культур методом компоновки**

Вибір року здійснюють аналогічним шляхом як і в попередньому випадку, розташовують середньовиважені суми дефіцитів за вегета-

цію розрахункової сівозміни ( $D_{cie}$ ) в зростаючому порядку і розраховують їх забезпеченість за формулою (10.23). Але не відміну від попереднього методу за цим рядом визначають не рік, що відповідає заданій забезпеченості, а сумарний дефіцит  $D_{p\%}$ . Іноді для більш точного визначення дефіциту водоспоживання будують графік залежності їх від забезпеченості і методом графічної інтерполяції уточнюють  $D_{p\%}$ . Для більш точних розрахунків застосовують згладжуючі теоретичні криві.

Аналогічні криві будують за кожну декаду вегетації кожної сільськогосподарської культури, і визначають дефіцити водоспоживання заданої забезпеченості за кожною кривою. Звісно, що отримані декадні дефіцити кожної культури не будуть співпадати з сумарним середньовиваженим значенням дефіциту водоспоживання у сівозміні  $D_{p\%}$ . Для вирівнювання отриманих значень за формулою (10.29) визначають середньовиважений дефіцит водоспоживання  $D_{cie}^1$ , де замість  $D_1, D_2, \dots, D_n$  приймають суми дефіцитів, визначені під задану забезпеченість, і визначають коефіцієнт пропорційності

$$K = \frac{D_{p\%}}{D_{cie}^1}. \quad (10.30)$$

Потім кожен декадний дефіцит, визначений під певну забезпеченість, вирівнюють, помноживши на коефіцієнт пропорційності  $K$ . За отриманими дефіцитами водоспоживання визначають строки і норми поливу під режим зрошення заданої забезпеченості.

Цей метод в найменшій мірі залежить від особливостей певного нестандартного року, ніж інші методи, так як в розрахунках приймають участь не окремі роки, а увесь ряд спостережень і вплив кожного року однаковий.

Даний метод рекомендований в Посібнику до ДБН В.2.4-1-99, розробленому за сприяння В.П. Остапчика.

**Вправа 10.4. Розрахунок режиму зрошення кукурудзи для року 75 %-вої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання методом компоновки**

Дано: 1. Подекадні дефіцити водоспоживання кукурудзи за багаторічний період (1949- 2019 рр.), розраховані біокліматичним методом А.М. і С.М. Алпатьєвих (табл. 10.7).

2. Розрахункова поливна норма – 30 мм.

## Розв'язання

Розрахунок проводять на підставі визначених середньодекадних дефіцитів водоспоживання, які можуть бути отримані будь-яким методом (табл. 10.7).

За декадними значеннями знаходять величину сумарного дефіциту водоспоживання за вегетацію, які також заносять до табл. 10.7.

Подекадні дефіцити і дефіцити водоспоживання за вегетацію розташовують в зростаючому порядку (табл. 10.8) і визначають їх забезпеченість за формулою (10.23).

За статистичним рядом визначають дефіцити водоспоживання для кожної декади вегетації і за зрошуваний сезон для року 75 %-ї забезпеченості, або найближчого року до заданої забезпеченості. Так, для розглянутого прикладу дефіцит водоспоживання за сезон року 75 %-ї забезпеченості склав 252 мм.

Результати подекадного розподілу дефіцитів водоспоживання року 75 %-ї забезпеченості заносять до табл. 10.9.

Як видно з прикладу суми подекадного дефіциту водоспоживання і розрахованого за сезон дефіциту водоспоживання не співпадають. Вони відповідно складають 333 і 247 мм. Це неспівпадіння необхідно вирівняти за допомогою коефіцієнту пропорційності, розрахованого за формулою (10.30) і він складе

$$K = \frac{252}{326} = 0,742.$$

За вирівняними дефіцитами водоспоживання можна розрахувати їх інтегральну криву і далі визначити строки поливу графічним способом або іншим способом, як було показано в розділі 9. Для кращої наочності на рис. 10.1 наведена інтегральна крива дефіциту водоспоживання кукурудзи на зерно для року 75 %-ї забезпеченості.

Як видно із графіка інтегральна крива має гладеньку форму, так як в ній виключені особливості якогось одного року і в розрахунку беруть участь всі роки ряду спостережень.

### ***Питання для самоконтролю***

1. Для чого оцінюють природне зволоження території і року?
2. Які принципи оцінки зволоженості території застосовують в наш час?
3. Які застосовують показники зволоження території?
4. У чому сутність гідротермічного показника Г.Т. Селянінова?
5. Як здійснюють вибір року заданої забезпеченості за атмосферними опадами?
6. Чому атмосферні опади при виборі року заданої забезпеченості розташовують в спадаючому порядку?
7. У чому особливість встановлення року заданої забезпеченості за комплексним кліматичним показником?



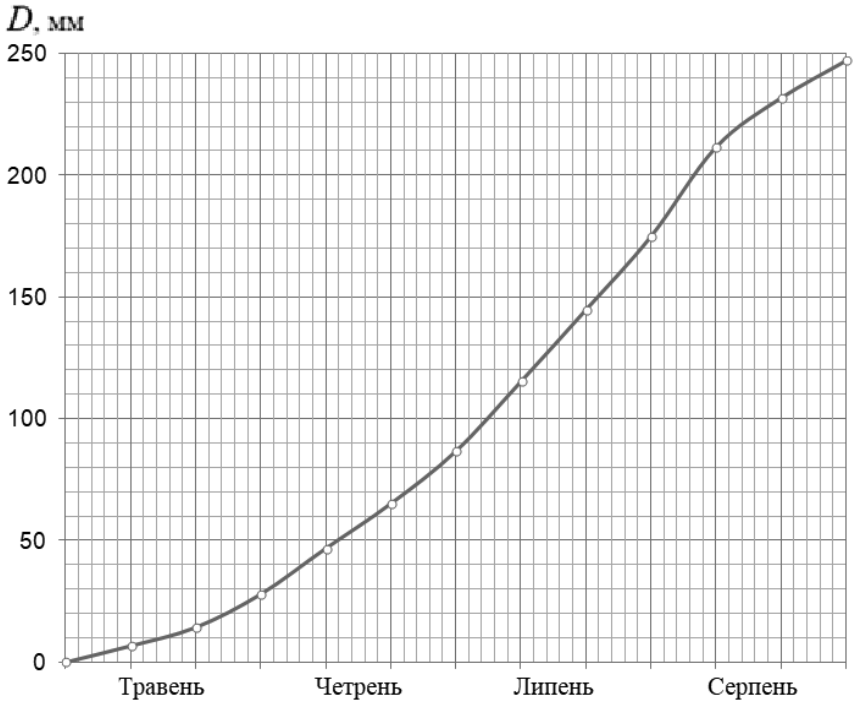
Таблиця 10.8 – Статистичний розподіл подекадних дефіцитів водоспоживання в иростиничному підсумку

№ з/п	р, %	Вегетаційний період																		За вегетацію					
		Квіт.			Травень			Червень			Липень			Серпень			Вересень								
		3	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3						
1	4,2																							39	
2	8,3																								104
3	12,5																								121
4	16,7																								149
5	20,8																								159
6	25,0																								161
7	29,2																								167
8	33,3																								173
9	37,5																								176
10	41,7																								180
11	45,8																								192
12	50,0																								196
13	54,2																								198
14	58,3																								198
15	62,5																								216
16	66,7																								218
17	70,8																								234
18	75,0	9,0	18,3	25,3	24,8	29,0	38,6	39,7	40,5	49,4	27,1	20,6													247
19	79,2	15,2	16,6	19,5	26,7	38,5	35,9	38,8	40,0	41,6	50,1	21,2													252
20	83,3	16,6	17,9	25,5	26,8	41,0	38,9	42,1	44,0	41,8	53,0	21,8	2,0												256
21	87,5	20,7	24,8	28,9	27,1	43,5	43,6	55,0	50,4	42,1	54,0	23,3	8,7												274
22	91,7	24,9	27,9	30,4	28,6	45,2	43,7	57,0	54,8	47,0	54,6	23,5	20,0	14,7											322
23	95,8	28,3	28,2	56,4	34,7	45,7	51,1	61,2	56,9	60,0	59,8	29,0	24,7	17,3	11,3										373



*Таблиця 10.9 – Внутрішньосезонний розподіл дефіцитів водоспоживання кукурудзи на зерно в рік 75 %-ї забезпеченості*

Параметр	Вегетаційний період															За вегетацію
	Травень			Червень			Липень			Серпень			За вегетацію			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
За роками-моделями, мм	9,0	10,3	18,3	25,3	24,8	29,0	38,6	39,7	40,5	49,4	27,1	20,6	333			
Відсотковий розподіл, %	2,7	3,1	5,5	7,6	7,4	8,7	11,6	11,9	12,2	14,8	8,2	6,3	100			
Виправлений за роком, мм	6,7	7,6	13,6	18,8	18,4	21,5	28,6	29,5	30,1	36,7	20,2	15,3	247			
Наростаючим підсумком, мм	6,7	14,3	27,9	46,7	65,1	86,6	115,2	144,7	174,8	211,5	231,7	247				



**Рисунок 10.1 – Інтегральна крива дефіцитів водоспоживання кукурудзи на зерно для року 75 %-ї забезпеченості розрахованої за даними метеостанції Синельникове**

8. Які метеорологічні величини і метеорологічні комплекси застосовують при встановленні ККП?
9. Які групи років виділяють при встановленні зволоженості за КПП?
10. Яка особливість вибору року заданої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання сільськогосподарських культур методом реального року?
11. За яким показником характеризують рік при виборі його за дефіцитами водоспоживання реального року?
12. Чому для характеристики зволоженості року приймають не один рік, а декілька?
13. Яка особливість вибору року заданої забезпеченості за дефіцитами водоспоживання сільськогосподарських культур методом компоновки?
14. Чому сума дефіцитів окремих років сухої групи років завжди більше річного дефіциту при встановленні року заданої забезпеченості методом компоновки?
15. Чому інтегральна крива для року заданої забезпеченості більш гладенька, ніж відповідні криві, розраховані за окремими роками? Як цього можна досягти?

# 11. ГРАФІКИ ПОЛИВІВ

## 11.1. Спеціалізація поливів за господарським призначенням

Система зрошення включає поливи різного господарського призначення або різної спеціалізації. За господарським призначенням поливи можуть бути: *вегетаційними, вологозарядковими, передпосівними або передпосадковими, післяпосівними або післяпосадковими, освіжаючими, передорними, удобрювальними та іншими.*

*Вегетаційні поливи* проводять для забезпечення потреб рослин у воді в період вегетації. Це важливий вид поливів в посушливій зоні, вони усувають дефіцит ґрунтової вологи в процесі вегетації, регулюють водний режим ґрунту в оптимальних для рослин межах, знижують негативну дію повітряної посухи. Строки та норми вегетаційних поливів залежать від вологості ґрунту, для розрахунку цих поливів існує багато методів (наприклад, ті, що розглянуті в розділах 4–9).

*Вологозарядкові поливи* проводять до сівби однорічних, або в період припинення активної вегетації багаторічних культур. Головним завданням їх є створити в кореневмісному шарі необхідний запас вологи для початкового і частково наступного періоду вегетації культур.

Такі поливи вирівнюють графік водокористування, відтягують початок вегетаційних поливів, скорочують їх кількість. На полях, що отримали вологозарядку, з'являються дружні сходи, коріння рослин проникає в глибокі шари ґрунту, використовуючи там вологу.

Найбільш ефективна вологозарядка в роки з посушливою осінню. Восени вологозарядку проводять під озимі культури, цукрові буряки і багаторічні трави. Навесні їх іноді застосовують під культури пізньої сівби, влітку – під післяжнивні і післяукісні посіви.

На осушуваних ґрунтах, і на полях з близьким заляганням ґрунтових вод вологозарядку не проводять.

Поливну норму визначають шляхом проведення дослідів, що враховують місцеві умови й біологічні особливості сільськогосподарських культур. Орієнтовно поливну норму можна визначити за формулою

$$m = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot (\beta_{HB} - \beta_{cep}) - 10P + E, \quad (11.1)$$

де  $P$  – середньо багаторічна кількість атмосферних опадів за період від поливу до сівби культури, мм;

$E$  – сумарне випаровування з поля за цей же період,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

Глибину зволоження під культури з потужною проникаючою в ґрунт кореневою системою приймають до 1,0-1,2 м, під інші культури – 0,6-0,8 м.

**Передорні поливи** проводять у випадку пересихання ґрунту до оранки. Завдання його – зволожити орний шар і створити сприятливі умови для високоякісного обробітку ґрунту. Поливна норма при цьому обмежується орним горизонтом.

**Провокаційні поливи** застосовують для боротьби з бур'янами. Їх здійснюють малими поливними нормами, що спонукають швидкому і дружному сходу бур'янів, які потім знищують суцільною культивуацією поля.

**Передпосівні і передпосадкові поливи** здійснюють безпосередньо перед сівбою або посадкою культур для поповнення запасів вологи в верхніх шарах ґрунту для забезпечення дружних та повних сходів або укорінення розсади, нормального росту та розвитку рослин на ранніх етапах. Ці поливи застосовують, як правило, під поукісні та пожнивні культури, картоплю літньої посадки, при висадці розсади овочів, а також перед посівом інших культур при пересиханні посівного шару ґрунту.

Залежно від ступеня висушування верхніх шарів ґрунту, рівня ґрунтових вод, норма цих поливів складає 200–600  $\text{м}^3/\text{га}$ .

**Досходові поливи** стимулюють появу дружних сходів при затриманні через висихання верхнього шару ґрунту. Необхідність в них звичайно виникає коли не був зроблений передпосівний полив. Разом з тим досходові поливи сприяють утворенню ґрунтової кірки, особливо на важких ґрунтах, тому поливна норма для дрібнонасісних культур не повинна перевищувати 120–200  $\text{м}^3/\text{га}$ . Для боротьби з ґрунтовою кіркою застосовують сітчасті борони.

**Післяпосівні та післяпосадкові поливи** застосовують при висадці розсадних культур для поліпшення приживання і початкового розвитку розсади; на пожнивних культурах для посіву яких застосовані стернові сіялки та насіння загортають в сухий ґрунт. Крім того, такі поливи проводять на посівах озимих колосових, коренеплодів, кукурудзи та інших культур в посушливі роки, коли відбувається швидке висихання активного шару і немає впевненості в отриманні рівномірних та дружних сходів.

Враховуючи можливі негативні наслідки від застосування після-посівних та післяпосадкових поливів норми їх не повинні перевищувати 300–400 м<sup>3</sup>/га, а на важких осолонцьованих ґрунтах і на посівах дрібнонасієних культур – 150–200 м<sup>3</sup>/га.

**Освіжаючі поливи** усувають повітряну посуху завдяки розпиленню в повітрі води у вигляді дрібних крапельок.

У степових районах одним із обмежуючих факторів підвищення продуктивності сільськогосподарських культур є недостатня вологість повітря і суховії, що часто повторюються. В цих умовах високу ефективність забезпечують освіжаючі поливи нормами 50–200 м<sup>3</sup>/га.

Найбільший ефект від освіжаючих поливів досягається в критичні періоди розвитку культур в особливості в час запліднення рослин та наливу зерна. Кратність проведення цих поливів визначається тривалістю екстремальних погодних умов та змін показників фітотемператури посівів сільськогосподарських культур. При тривалій повітряній посузі освіжаючі поливи повинні повторюватись через 3–4 доби.

**Удобрювальні поливи** застосовують для внесення і рівномірного розподілу добрив у відповідності до потреби рослин у живленні. Строки цих поливів і вид добрив для сумісного внесення визначають з урахуванням біологічних особливостей культур.

Їх можна поєднувати із вологозарядковими поливами (основні добрива), або з вегетаційними поливами (підживлення). З цією метою розроблені спеціальні підживлювальні пристрої для дощувальних машин (фертигатори), що дозволяють вносити разом з поливами мінеральні добрива та розчинні хімічні меліоранти, гербіциди, мікроелементи, тощо.

Особливо ефективні удобрювальні поливи при застосуванні краплинного способу поливу.

**Протизаморозкові поливи** призначені для попередження і прямого захисту рослин від заморозків. У результаті поливу підвищується відносна вологість повітря, що знижує тепловіддачу ґрунту та рослин. Поливати краще дощуванням або аерозольним способом до настання, або під час заморозків.

**Промивні поливи** застосовують для зниження концентрації ґрунтового розчину і видалення солей з кореневмісного шару ґрунту. Проводять їх звичайно пізно восени або взимку. Норма їх розраховується залежно від кількості солей, які необхідно видалити із розрахованого шару ґрунту. Одночасно вони можуть виконувати роль вологозарядкових.

Отже, основу поливного режиму складають вегетаційні поливи, що розраховують залежно від вологості ґрунту. Для деяких культур, залежно від їх специфіки вирощування та умов, що склались призначають додаткові поливи (вологозарядкові, передпосівні, передпосадкові, післяпосівні, післяпосадкові або освіжаючі), ці всі поливи складають поливний режим окремої культури і сівозміни в цілому.

## 11.2. Графіки поливів сільськогосподарських культур в сівозміні та на зрошувальній системі

Режим зрошення окремої сільськогосподарської культури або всієї сівозміни в цілому можна зобразити у вигляді графіку, на якому наочно видно, в які дні потрібно починати поливи, їх кількість за вегетаційний період, а також кількість води, яку необхідно подавати протягом поливного періоду.

Таке графічне представлення зрошення може бути виражене у вигляді графіку поливних витрат або гідромодулів. Графіки поливних витрат застосовують при проектуванні невеликих зрошуваних масивів (одна-дві сівозміни), а графік гідромодулів застосовують для великих зрошувальних систем з декількома сівозмінами.

### Складання та побудова неуконплектованого графіку поливів

За попередніми аналітичними розрахунками, результати яких заносять в спеціальну відомість (табл. 11.1) встановлюють строки, тривалість та величину поливів кожного поля сівозміни.

Таблиця 11.1 – Відомість графіку поливів

№ поля	Сільськогосподарська культура	Зрошувана площа поля, га	Зрошувальна норма, м <sup>3</sup> /га	№ поливу	Поливна норма		Строки поливу		Тривалість поливу, дб	Поливна витрата, л/с
					нетто	брутто	початок	кінець		
1	Пшениця озима	59,1	1200	1	300	330	9.05	12.05	4	56
				2	300	330	20.05	23.05	4	
				3	300	330	30.05	2.06	4	
				4	300	330	21.06	24.06	4	

Поливну витрату води ( $Q$ , л/с) визначають за формулою

$$Q = \frac{m \cdot F}{3,6 \cdot t \cdot \tau}, \quad (11.2)$$

де  $m$  – поливна норма, брутто, тобто поливна норма, що враховує втрати води при поливі, м<sup>3</sup>/га;

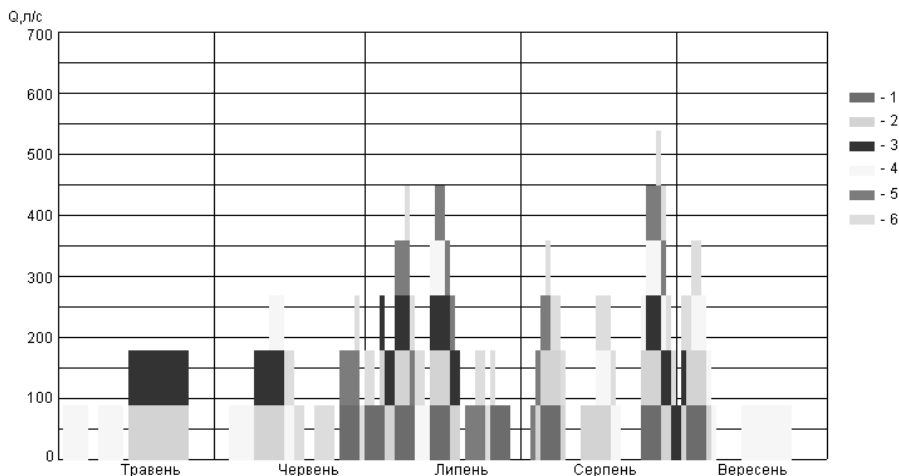
$F$  – зрошувана площа поля, що зайнята розрахунковою культурою, га;

$t$  – тривалість поливу, дні;

$\tau$  – тривалість поливу протягом доби, год.

Як правило, приймають цілодобовий полив в три зміни по 8 годин ( $\tau=24$  години), або полив в дві зміни по 10 годин ( $\tau=20$  годин).

Потім будують неукомплектований графік поливних витрат (рис. 11.1). Для цього на аркуші міліметрового паперу наносять осі координат. На осі ординат ( $Y$ ) відкладають витрати  $Q$ , а на лінії абсцис ( $X$ ) – календар на весь вегетаційний період. Перед тим як будувати графік поливів, кожній сільськогосподарській культурі призначають відповідне позначення (штриховкою або кольором).



**Рисунок 11.1. Неукомплектований графік поливів**

Побудова графіку полягає в наступному:

- 1.3 дня початку поливу (строки беруть із відомості поливів) будують перпендикуляр до величини ординати розрахункової витрати поливу; те ж саме роблять і вдень закінчення поливу. Відкладені ординати зверху з'єднують, після чого у вигляді

прямокутника отримують графічне зображення поливу. Аналогічно будують всі поливи першої в відомості культури, після чого переходять до наступної.

2. Якщо строки поливів наступної культури не співпадають із строками вже відкладеної на графіку культурою, то побудову ординат здійснюють таким же чином, як описано раніше.
3. Якщо, строки поливів сільськогосподарської культури, що необхідно показати на графіку, повністю або частково співпадають з тими, що вже нанесені на графік, необхідно:
  - а) якщо строки поливів співпадають не повністю, величини поливних витрат відкладаються від верхнього кінця попередньої ординати тільки для тих днів що співпадають, а для всіх інших – величина поливної витрати відкладається від координатної осі – лінії абсцис;
  - б) у випадку повного співпадіння строків поливу величину поливної витрати відкладають від верхнього кінця попередніх ординат. При обчисленні тривалості поливу і його побудові необхідно враховувати день початку і день кінця поливу.

При аналізі неуккомплектованого графіка поливів, можна помітити, що він не може бути прийнятий для практичного користування, так як він характеризується різкими коливаннями загальних поливних витрат, має періоди з великою завантаженістю поливами і перерви в подачі води. У зв'язку з тим, що зрошувальні канали, трубопроводи, гідротехнічні споруди та поливну техніку необхідно розраховувати на максимальну ординату поливної витрати, реалізація неуккомплектованого графіку у виробництві привела б до значного подорожчання будівництва зрошувальної мережі та її експлуатацію.

Для того, щоб виключити негативні сторони такого графіка, його необхідно перебудувати таким чином, щоб величина ординат протягом всього поливного періоду була б однаковою, або близькою між собою. Перебудову графіка відповідно до вищевикладених вимог називають укомплектуванням. При укомплектуванні графіка поливів розрізняють два основних способи, що застосовують в меліоративній практиці залежно від способу та техніки поливу.

### **Укомплектування графіка поливів за середньою витратою**

Цей метод характерний тим, що поливи в укомплектованому графіку планують в кожен календарний період тільки на одному полі, й



по можливості в максимально короткі строки. Його застосовують при поверхнево-самопливному способі поливу, при поливах із стаціонарної мережі дощуванням окремими апаратами та зрошенні мобільними дощувальними машинами, які можна перетягувати з поля на поле і під час поливу зосередити їх на одному полі.

При укомплектуванні графіку поливів цим методом необхідно виконувати такі умови:

- поливи необхідно планувати в межах поливного періоду неуккомплектованого графіка. Якщо виникає необхідність змінити строки поливу, то це можливо не більше, ніж на три доби раніше поливного періоду і ні в якому разі не пізніше призначеного в неуккомплектованому графіку;
- величина поливних норм і, відповідно, площа прямокутника в неуккомплектованому графіку, яка характеризує, кількість води, що йде на один полив, не повинна змінюватись, тобто  $Q_1 \cdot t_1 = Q_2 \cdot t_2$ , де  $Q_1$  та  $t_1$  – поливна витрата та тривалість поливу в неуккомплектованому графіку,  $Q_2$  та  $t_2$  – те ж саме, в укомплектованому графіку.

Для укомплектування необхідно визначити для всіх сільськогосподарських культур, що входять до сівозміни, середню ординату поливної витрати ( $Q_{сер}$ , л/с). Для цього на неуккомплектованому графіку вибирають найбільш завантажений період (тобто найменший за тривалістю період за який здійснюють найбільшу кількість поливів). Потім за всі поливи сільськогосподарських культур, що входять в цей період, знаходять суму добутків  $\sum Q_1 t_1$ . Середню витрату визначають за формулою

$$Q_{сер} = \frac{\sum Q_1 t_1}{T + 3}, \quad (11.3)$$

де  $T$  – тривалість найбільш завантаженого періоду, діб.

При розрахунках середньої ординати тривалість розрахункового періоду збільшують на 3 доби, що і враховують у формулі, тобто при укомплектуванні графіка поливів можна змінювати строки поливів до трьох діб.

Отримавши  $Q_{сер}$  знаходять нову тривалість кожного поливу за формулою

$$t_2 = \frac{Q_1 t_1}{Q_{сер}}. \quad (11.4)$$

Отримане значення  $t_2$  повинне бути кратним цілій кількості діб, або робочих змін, якщо в розрахунках виходить дробове число, то  $t_2$  округлюють і роблять перерахунок витрати за формулою

$$Q_2 = \frac{Q_1 t_1}{t_{2(\text{окр})}}. \quad (11.5)$$

Отже, необов'язково, щоб поливні витрати укомплектованого графіка були рівними середній ординаті. Однак, потрібно прагнути, щоб за можливістю вони були однакові, так як, чим рівніші і менші ординати графіка, тим вище техніко-економічні показники режиму зрошення (рис. 11.2).

**Вправа 11.1. Побудувати неукомплектований графік поливів та укомплектувати його за середньою витратою**

Дано: 1. Зрошуваний масив з шестипільною сівзміною:

- 1 – люцерна 2-го року,
  - 2 – люцерна 3-го року,
  - 3 – пшениця озима,
  - 4 – пшениця озима + кукурудза на зелений корм (поживно),
  - 5 – кукурудза на зелений корм,
  - 6 – пшениця озима + літній посів люцерни.
2. Поля рівновеликі площею 72 га кожне.  
 3. Режим зрошення прийнятий за рекомендаціями (додаток С).  
 4. Коефіцієнт, який враховує втрати води при поливі  $k^{(6)} = 1,15$ .

*Розв'язання*

При складанні графіків поливу необхідно враховувати не тільки вегетаційні поливи, а й вологозарядкові, передпосадкові, передпосівні і при необхідності інші види поливів.

Вологозарядкові поливи планують, як правило, для озимих культур для створення необхідного запасу ґрунтової вологи у осінній та ранньовесняний періоди вегетації і його планують на попередньому полі. В даній вправі перед посівом пшениці озимої запланований вологозарядковий полив нормою 600 м<sup>3</sup>/га. Його проводять після вирощування люцерни 3-го року (2 поле), пшениці озимої (3 поле) та кукурудзи на зелений корм (5 поле), тобто на попередниках пшениці озимої.

При вирощуванні поживних культур планують передпосівні або післяпосівні поливи, так як, на кінець вегетації основної культури запаси легкодоступної вологи будуть вичерпані. В даній вправі передбачені передпосівні поливи при вирощуванні поживних: злакобобових (4 поле), люцерни літнього посіву (6 поле).

Поливну норму нетто призначають за формулою (7.4), (7.5), або як достовірну за формулою (7.7). Поправочний коефіцієнт  $k^{(6)}$  в даному випадку складає 1,15.

Після встановлення потрібної кількості поливів, їх строків і величини переходять до побудови графіка поливів в такій послідовності:

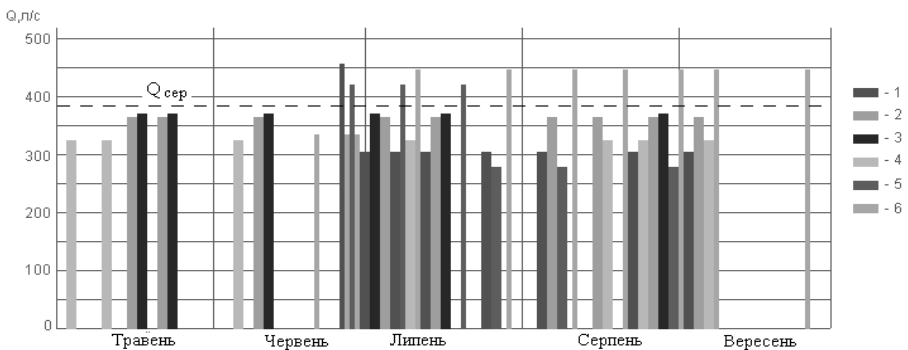
1. Розраховують відомість неукмплектованого графіку поливів (табл. 11.2). Строки та величину поливів приймають за попередніми розрахунками режимів зрошення, розрахованим будь-яким із описаних способів або за рекомендаціями науково-дослідних установ. Для даної справи строки поливів прийняті за додатком С, де розрахунок строків поливу виконаний для базових метеостанцій фізико-географічних зон і підзон України.
2. За даними відомості будують неукмплектований графік поливів (див. рис. 11.1).
3. З неукмплектованого графіку вибирають найбільш завантажений період, в даному випадку з 4.06 до 9.06, тобто 6 днів. Всі поливи, які входять в цей період заносять у відомість визначення середньої ординати (табл. 11.3). Середню ординату визначають за формулою (11.3).

**Таблиця 11.3 – Відомість визначення середньої поливної витрати**

Сільськогосподарська культура	№ поля	№ поливу	$Q_1$ , л/с	$t_1$ , діб	$Q_1 t_1$
Пшениця озима	3	3	82	5	410
	4	3	82	5	410
	7	3	82	5	410
Люцерна	1	2	85	6	510
	2	2	85	6	510
<b>Сума</b>					<b>2250</b>

$$Q_{сер} = \frac{2250}{6 + 3} = 250 \text{ л/с.}$$

На отриману середню витрату укомплектовують графік поливів (див. рис. 11.2) і складають відомість укомплектованого графіка (табл. 11.3).



**Рисунок 11.2 – Укомплектований графік поливів за середньою витратою**

**Таблиця 11.2 Відомість неукомплектованого графіку поливів**

№ з/п	Сільськогосподарська культура	Зрошувана площа поля, га	Зрошувальна норма, м <sup>3</sup> /га	№ поливу	Поливна норма, м <sup>3</sup> /га		Строки поливів		Тривалість поливу, дб	Полівні витрати, л/с
					нетто	брутто	початок	кінець		
1	Люцерна 2-го року	72	3500	1	500	575	20.05	26.05	7	73
				2	500	575	4.06	9.06	6	85
				3	500	575	26.06	1.07	6	85
				4	500	575	12.07	18.07	7	73
				5	500	575	28.07	2.08	6	85
				6	500	575	11.08	17.08	7	73
				7	500	575	4.09	12.09	9	57
2	Люцерна 3-го року	72	2600	1	500	575	20.05	26.05	7	73
				2	500	575	4.06	9.06	6	85
				3	500	575	26.06	1.07	6	85
				4	500	575	12.07	18.07	7	73
				В	600	690	21.08	31.08	11	56
3	Пшениця озима	72	2100	1	300	345	10.05	13.05	4	76
				2	400	460	25.05	29.05	5	82
				3	400	460	5.06	9.06	5	82
				4	400	460	15.06	19.06	5	82
				В	600	690	21.08	31.08	11	56
4	Пшениця озима + кукурудза на зелений корм (поживно)	72	3300	1	300	345	10.05	13.05	4	76
				2	400	460	25.05	29.05	5	82
				3	400	460	5.06	9.06	5	82
				4	400	460	15.06	19.06	5	82
				П	300	345	10.07	13.07	4	76
				1	300	345	21.07	24.07	4	76
				2	400	460	3.08	6.08	4	102
				3	400	460	18.08	21.08	4	102
				4	400	460	31.08	3.09	4	102
5	Кукурудза на зелений силос	72	1900	1	300	345	11.06	14.06	4	76
				2	300	345	23.06	26.06	4	76
				3	300	345	6.07	9.07	4	76
				4	400	460	20.07	23.07	4	102
				В	600	690	25.08	31.08	7	87
6	Пшениця озима + люцерна літнього посіву	72	3600	1	300	345	10.05	13.05	4	76
				2	400	460	25.05	29.05	5	82
				3	400	460	5.06	9.06	5	82
				4	400	460	15.06	19.06	5	82
				П	600	690	10.07	15.07	6	102
				1	300	345	2.08	6.08	5	61
				2	400	460	13.08	17.08	5	82
				3	400	460	29.08	2.09	11	37
				4	400	460	18.09	22.09	5	82

## Укомплектування графіку поливів за витратою дощувальних машин

При використанні на зрошуваних землях широкозахватної дощувальної техніки, коли витрати конкретної машини визначаються її технічними характеристиками в укомплектованому графіку поливів необхідно розраховувати тривалість кожного поливу за формулою

$$t_2 = \frac{F \cdot m}{3,6 \cdot Q_m \cdot \tau \cdot k_{зм}}, \quad (11.6)$$

де  $Q_m$  – витрата дощувальної машини, л/с;

$k_{зм}$  – коефіцієнт використання часу зміни; який враховує втрати робочого часу на технологічні і організаційні операції при проведенні поливу.

Отримане значення  $t_2$  повинне бути кратним цілій кількості діб або робочих змін. Якщо виходить дробове число, то його округлюють в більшу сторону. За отриманими значеннями  $t_2$  та  $Q_m$  будують укомплектований графік поливів (рис. 11.3), таким чином, щоб були якомога менші загальні витрати води.

Укомплектування здійснюють за рахунок зміщення середньої дати поливів (як правило, не більше 3–5 днів), зміни тривалості поливу (в межах 3–10 днів) при допустимій тривалості міжполивного періоду (не більше, ніж на 3–5 дня).

У разі, якщо не вдається укомплектувати графік поливів, щоб витримати вимоги, наприклад, виходить дуже довга тривалість поливу або короткий міжполивний період, тоді графік укомплектовують із розрахунку, що на одному полі стоять декілька машин, або необхідно замінити вибрані раніше машини (частіше за все з більшою витратою).

### **Вправа 11.2. Укомплектувати графік поливів за витратою води дощувальних машин.**

Дано: 1. Зрошуваний масив з семипільною сівозміною:

1,2 – люцерна,

3 – пшениця озима,

4 – пшениця озима + кукурудза на зелений корм (поживно),

5 – кукурудза на зелений корм,

6 – озима пшениця з літнім посівом люцерни.

2. Поля рівновеликі – 72 га.

3. Режим зрошення прийнятий за рекомендаціями УкрНДІЗЗа (додаток С).

4. Коефіцієнт, який враховує втрати води при поливі  $k^{(6)} = 1,15$ .

5. Поливна техніка ДФ-120 «Дніпро», витрати води  $Q_M = 120$  л/с.

Таблиця 11.3 – Відомість укомплектованого графіку поливів за середньою витратою

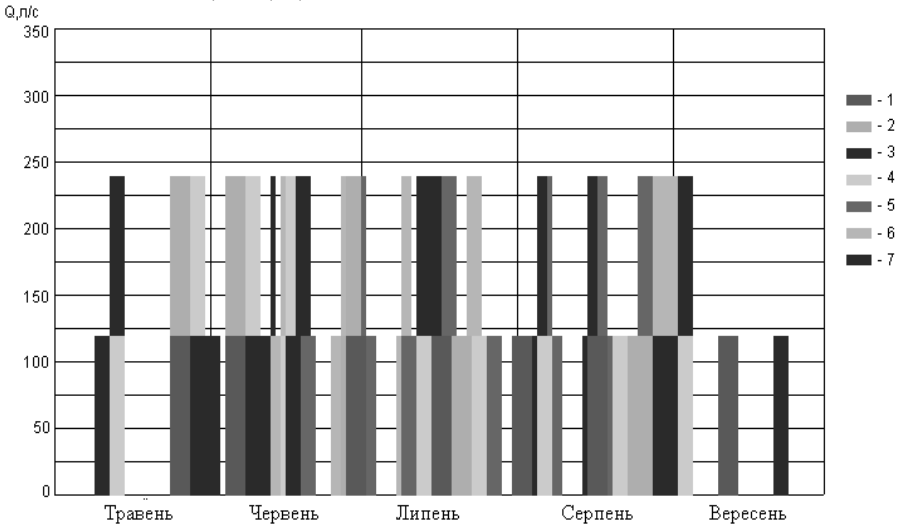
№ з/п	Сільськогосподарська культура	Зрошувана площа поля, га	Зрошувана норма, м <sup>3</sup> /га	№ поливу	Поливна норма, м <sup>3</sup> /га		Строки поливів		Тривалість поливу, діб	Поливні витрати, л/с
					нетто	брутто	початок	кінець		
1	Люцерна 2-го року	72	3500	1	500	575	18.05	20.05	3	170
				2	500	575	30.05	1.06	3	170
				3	500	575	24.06	26.06	3	170
				4	500	575	11.07	13.07	3	170
				5	500	575	29.07	31.07	3	170
				6	500	575	11.08	13.08	3	170
				7	500	575	6.09	8.09	3	170
2	Люцерна 3-го року	72	2600	1	500	575	21.05	23.05	3	170
				2	500	575	2.06	4.06	3	170
				3	500	575	27.06	29.07	3	170
				4	500	575	14.07	16.07	3	170
				В	600	690	20.08	22.08	3	204
3	Пшениця озима	72	2100	1	300	345	9.05	10.05	2	153
				2	400	460	24.05	25.05	2	204
				3	400	460	5.06	6.06	2	204
				4	400	460	13.06	14.06	2	204
				В	600	690	23.08	25.08	3	204
4.	Пшениця озима + кукурудза на зелений корм (пожнивню)	72	3300	1	300	345	11.05	12.05	2	153
				2	400	460	26.05	27.05	2	204
				3	400	460	7.06	8.06	2	204
				4	400	460	15.06	16.06	2	204
				П	300	345	6.07	7.07	2	153
				1	300	345	22.07	23.07	2	153
				2	400	460	4.08	5.08	2	204
				3	400	460	18.08	19.08	2	204
				4	400	460	31.08	109	2	204
				6	Кукурудза на зелений корм	72	1900	1	300	345
2	300	345	22.06					23.06	2	153
3	300	345	2.07					3.07	2	153
4	400	460	20.07					21.07	2	204
В	600	690	28.08					30.08	3	204
7	Пшениця озима + люцерна літнього посіву	72	3600	1	300	345	13.05	14.05	2	153
				2	400	460	28.05	29.05	2	204
				3	400	460	9.06	10.06	2	204
				4	400	460	17.06	18.06	2	204
				П	600	690	8.07	10.07	3	204
				1	300	345	2.08	3.08	2	153
				2	400	460	14.08	15.08	2	204
				3	400	460	2.09	3.09	2	204
				4	400	460	19.09	20.09	2	204

### Розв'язання

1. Розраховують відомість неуккомплектованого графіка та будують неуккомплектований графік поливів як показано в попередній вправі (табл.11.2 та рис. 11.1).
2. На неуккомплектованому графіку для поливу дощувальною машиною ДФ-120 «Дніпро» уточнюють тривалість поливів, виходячи із витрат дощувальної машини 120 л/с за формулою (11.6).
3. Проводять комплектування графіку поливів таким чином, щоб загальні витрати води були якомога меншими (рис.11.3).
4. За даними укомплектованого графіку розраховують і заповнюють відомість укомплектованого графіку (табл.11.4).

Укомплектований графік поливу вважають задовільним, якщо загальний гідромодуль, який розраховують за формулою  $q = \frac{Q}{F}$ , менше 0,7 л/(с·га), а загальна тривалість поливів з максимальною витратою більше 10 діб.

$Q_{\max}=240\text{л/с}$   $F_{\text{сев}}=504,0\text{га}$   $q=0,48\text{л/(с}\cdot\text{га)}$



**Рисунок 11.3 – Укомплектований графік поливів під дощувальну машину ДФ-120 «Дніпро»**

У розглянутому прикладі загальний гідромодуль складає  $q = \frac{240}{504} = 0,48$  л/(с·га), тривалість поливів з максимальною витратою 60 діб, що свідчить про задовільне комплектування графіку поливів.

**Таблиця 11.4 – Відомість укомплектованого графіку поливів  
під полив дощувальними машинами ДФ-120 «Дніпро»**

№ з/п	Сільськогосподарська культура	Зрошувана площа поля, га	Зрошувана норма, м <sup>3</sup> /га	№ поливу	Поливна норма, м <sup>3</sup> /га		Строки поливів		Тривалість поливу, днів	Полівні витрати, л/с
					нетто	брутто	початок	кінець		
1	Люцерна 2-го року	72	3500	1	500	575	23.05	26.05	4	120
				2	500	575	3.06	6.06	4	
				3	500	575	27.06	30.06	4	
				4	500	575	14.07	17.07	4	
				5	500	575	30.07	2.08	4	
				6	500	575	14.08	17.08	4	
				7	500	575	9.09	12.09	4	
2	Люцерна 3-го року	72	2600	1	500	575	23.05	26.05	4	120
				2	500	575	3.06	6.06	4	
				3	500	575	26.06	29.06	4	
				4	500	575	18.07	21.07	4	
				В	600	690	22.08	26.08	5	
3	Пшениця озима	72	2100	1	300	345	8.05	10.05	3	120
				2	400	460	27.05	29.05	3	
				3	400	460	7.06	9.06	3	
				4	400	460	15.06	17.06	3	
				В	600	690	27.08	31.08	5	
4	Пшениця озима + кукурудза на зелений корм (пожнивно)	72	3300	1	300	345	11.05	13.05	3	120
				2	400	460	27.05	29.05	3	
				3	400	460	7.06	9.06	3	
				4	400	460	14.06	16.06	3	
				П	300	345	11.07	13.07	3	
				1	300	345	22.07	24.07	3	
				2	400	460	4.08	6.08	3	
				3	400	460	19.08	21.08	3	
				4	400	460	01.09	3.09	3	
5	Кукурудза на зелений корм	72	1900	1	300	345	12.06	14.06	3	120
				2	300	345	24.06	26.06	3	
				3	300	345	7.07	9.07	3	
				4	400	460	21.07	23.07	3	
				В	600	690	27.08	31.08	3	
6	Пшениця озима + люцерна літнього посіву	72	3600	1	300	345	11.05	13.05	3	120
				2	400	460	30.05	1.06	3	
				3	400	460	10.06	12.06	3	
				4	400	460	17.06	19.06	3	
				П	600	690	11.07	15.07	5	
				1	300	345	3.08	5.08	3	
				2	400	460	13.08	15.08	3	
				3	400	460	1.09	3.09	3	
				4	400	460	20.09	22.09	3	



### 11.3. Графік гідромодулів

Для великого земельного масиву, коли немає конкретних даних про площу, яку займають окремі культури, подачу води встановлюють на один осереднений гектар. Для цього потрібно знати склад культур, частку площі, що вони займають на масиві ( $\alpha$ ), і режим зрошення кожної культури.

Витрату води, необхідну для зрошення культури на один осереднений гектар, називають *гідромодулем*, і визначають за формулою

$$q = \frac{\alpha \cdot m}{3,6 \cdot t \cdot \tau}, \quad (11.7)$$

де  $q$  – ордината гідромодуля, л/с/га.

Підсумовуючи за часом ординати питомих витрат всіх культур, що входять до сівозміни, отримують неуккомплектований графік гідромодуля. Графік сівозміни укомплектовують аналогічно, як і графік режиму зрошення, виражений у витратах.

Ординату гідромодуля, що відповідає витраті  $Q$  (л/с) можна знайти за формулою

$$q = \frac{Q}{F_{civ}}, \quad (11.9)$$

де  $F_{civ}$  – зрошувана площа сівозміни, га.

#### **Питання для самоконтролю**

1. Які розрізняють види поливів за господарським призначенням?
2. Для чого проводять вологозарядкові поливи? Як їх призначають?
3. Коли призначають передорний полив?
4. Для чого проводять провокаційний полив?
5. Яке призначення передпосівних і передпосадкових поливів?
6. Коли проводять досходові поливи?
7. Яка мета проведення післяпосівних та післяпосадкових поливів?
8. Для чого здійснюють освіжаючі поливи?
9. Для чого призначені удобрювальні поливи?
10. Яка мета проведення протизаморозкових поливів?
11. В яких випадках проводять промивні поливи?
12. Що таке графіки поливів?
13. Чому графіки поливів необхідно укомплектувати?
14. Які способи укомплектування графіків поливу застосовують?
15. Що називають гідромодулем?
16. Які застосовують критерії укомплектування графіків поливу?

## 12. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ ПІД РІЗНІ СПОСОБИ ПОЛИВУ

Розглянуті способи розрахунку режимів зрошення застосовують, як правило, для дощування і поверхнево-самопливного поливу, які є найбільш поширеними в світі.

При застосуванні *сучасних дощувальних машин* можна здійснювати полив будь-якою поливною нормою. При цьому зрошувальна вода буде розподілена рівномірно по всій зрошуваній площі. Обмеженням може бути тільки достаткова поливна норма, коли на поверхні ґрунту можуть утворюватися калюжі і поверхневий стік. Тому, в більшості випадків, намагаються задавати як найменшу поливну норму при збільшеній кількості поливів.

При застосуванні *поверхнево-самопливного поливу* навпаки намагаються його проводити збільшеними поливними нормами, що дає можливість зменшити кількість поливів і більш рівномірно розподілити воду вздовж поливних борозен і смуг. При розрахунку елементів техніки поливу по борознах і смугах застосовують теоретичні розробки, що враховують затухання швидкості вбирання води ґрунтом і накопичення води в борозні чи смугі. Ці теоретичні розробки і регламентують тривалість поливу при заданій поливній нормі та глибині промочування ґрунту.

### 12.1. Розрахунок режиму зрошення під рисові сівозміни

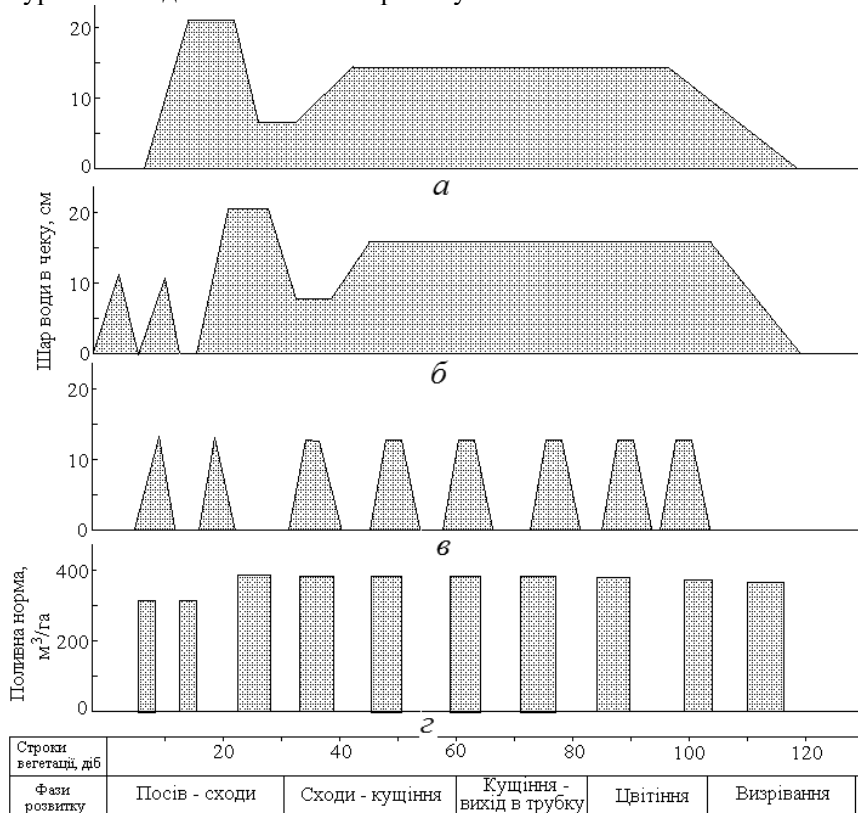
Особливістю режиму зрошення рисових систем є те, що зрошення здійснюють затопленням, при цьому зрошувальна норма значно завищена в декілька разів, так як транспірація рису більше, ніж транспірація інших культур, випаровування води відбувається не з ґрунту, а з водної поверхні, крім того мають місце значні втрати на насичення ложа чека до повної вологості, на бокову фільтрацію і глибинний скид.

Існує декілька способів вирощування рису: із затопленням, з періодичним поливом і без зрошення.

**Без зрошення** рис можна вирощувати в тих місцях, де сума річних опадів перевищує 1000 мм.

Рис з *періодичними поливами* можна вирощувати як звичайну культуру, в польових сівозмінах, але зі значною кількістю поливів (7–12) і підвищеною зрошувальною нормою (5000–7000 м<sup>3</sup>/га).

Найбільш поширене зрошення рису *затопленням*, яке буває постійним, скороченим і переривчастим (рис. 12.1). Режим зрошення рису залежить від його сорту, ступеня засолення ґрунтів, наявності бур'янів і водозабезпеченості району.



**Рисунок 12.1 – Графіки режимів зрошення рису:**

*а* – постійне затоплення; *б* – скорочене затоплення; *в* – періодичне затоплення; *г* – зрошення з періодичними поливами.

**Переривчасте затоплення** (рис. 12.1, *в*) поширене значно менше, проте є багато експериментальних і виробничих даних, які свідчать про доцільність його застосування в певних умовах. Переривчасте затоплення рису доцільне на незасолених ґрунтах зі значною фільтрацією ( $K_f > 0,5$  м/добу), а також при недостатній зрошувальній спроможності джерела зрошення. Застосування переривчастого затоплення дозволяє значно скоротити зрошувальну норму рису.

**Постійне затоплення** (рис. 12.1, а) застосовують на засолених і сильно засолених (понад 2 %) ґрунтах з малою фільтраційною здатністю (менше 0,5 м/добу).

На полях, забур'янених просянками, засолених менше 2 %, після з'явлення сходів створюють шар води, що перевищує висоту рослин на 5–7 см. Залежно від висоти бур'янів шар води доводять до 20–25 см. Через 5–6 днів, коли бур'яни загинуть, шар води зменшують до 4–5 см, для укріплення сходів і кращого кушіння рису. З ростом рослин глибину води збільшують до 12–15 см і цей шар підтримують до кінця фази молочної стиглості.

На більш засолених ґрунтах поле затоплюють відразу після посіву, а через 5–6 днів шар води скидають для видалення розчинених солей. Потім знову створюють шар 12–15 см, який знижують до 3–5 см на період кушіння. Після цього режим затоплення залишається таким самим, як і в попередньому випадку. Крім того, в таких умовах для кращого водообміну на рисових полях передбачають проточність води.

**Скорочене затоплення** (рис. 12.1, б) є основним режимом зрощення рису. Цей режим застосовують на чистих від бур'янів полях з вмістом солей менше 1–2 % від маси ґрунту. Відразу після посіву проводять зволожувальні поливи до появи сходів. Після утворення 2–3 листків вносять гербіциди для знищення бур'янів і затоплюють поле шаром 15–20 см на 4–5 діб до повного їх знищення. На період кушіння шар води зменшують до 2–3 см, а з ростом рису його підвищують на дві третини висоти рослин і доводять до 15–18 см. Цей шар підтримують до фази молочної стиглості.

**Зрошувальна норма рису** залежить від тривалості вегетаційного періоду, кліматичних, ґрунтово-меліоративних і гідрогеологічних умов, а також від сорту рису. Зрошувальна норма рису визначається із загального рівняння водного балансу

$$M = E + W + F_e + F_{\bar{e}} + S_{np} + S_{ck} + S_{впр} - \mu P, \quad (12.1)$$

де  $M$  – зрошувальна норма рису, м<sup>3</sup>/га;

$E$  – водоспоживання рису, залежно від району вирощування і сорту становить 5–12 тис. м<sup>3</sup>/га;

$W$  – об'єм води, що витрачається на насичення шару ґрунту під чеком, м<sup>3</sup>/га;

$F_e$  та  $F_{\bar{e}}$  – об'єм води, що витрачається на вертикальну та бокову фільтрацію, м<sup>3</sup>/га;

$S_{np}$  – об’єм води, що витрачається на проточність або зміну води в чеку, м<sup>3</sup>/га;

$S_{ск}$  – об’єм вимушених скидів води (1-4 тис. м<sup>3</sup>/га);

$S_{впр}$  – величина технологічних втрат через водовипуски, приймають 5–10 % від  $(E + F_е + F_б + S_{np})$ , м<sup>3</sup>/га;

$\mu P$  – атмосферні опади, що використовуються на поповнення воло- ги, м<sup>3</sup>/га.

Об’єм води, що витрачається на насичення шару ґрунту від пове- рхні чека до рівня ґрунтових вод, чи водоупору ( $H$ , м), визначають за формулою

$$W = AH(\beta_{ПВ} - \beta_n), \quad (12.2)$$

де  $A$  – шпаруватість ґрунту в шарі  $H$ , %;

$\beta_{ПВ}$  та  $\beta_n$  – вологість ґрунту, що відповідає повній вологоємкості, і наявна вологість перед затопленням чеків, % від шпаруватості ґрунту.

Цей об’єм води, як правило, становить 1,5–4,0 тис.м<sup>3</sup>/га.

Втрати води на вертикальну і бокову фільтрацію рисового поля ( $F_е + F_б$ ) на однорідних ґрунтах можна визначити за формулою Дю- пюї.

Періодичні скиди або зміна шару води потрібні у тому випадку, коли мінералізація її перевищує 1,5–2,0 г/л. Для скорочення зрошу- вальної норми скиди в період куштиння і визрівання необхідно замінити своєчасним припиненням подачі води, а для ліквідації технічних втрат необхідно встановлювати більш досконалі водовипуски.

Середня зрошувальна норма рису для півдня України складає 15700 м<sup>3</sup>/га.

**Таблиця 12.1 – Розподіл зрошувальної норми за місяцями, %**

Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Рік
20	30	25	20	5	100

**Гідромодуль рису.** Для визначення гідромодуля водоподачі і скиду на рисових масивах визначають складові зрошувальної норми на кожну фенологічну фазу розвитку рису. Сумарний об’єм водопо- дачі (м<sup>3</sup>/га) і гідромодуль (л/с·га) за кожен період ( $t$ , діб) визначають за формулою

$$q = \frac{E + W + F_{\epsilon} + F_{\bar{\sigma}} + S_{np} + S_{ск} + S_{всп}}{86,4 \cdot t}, \quad (12.3)$$

де позначення аналогічні, що і при визначенні зрошувальної норми рису.

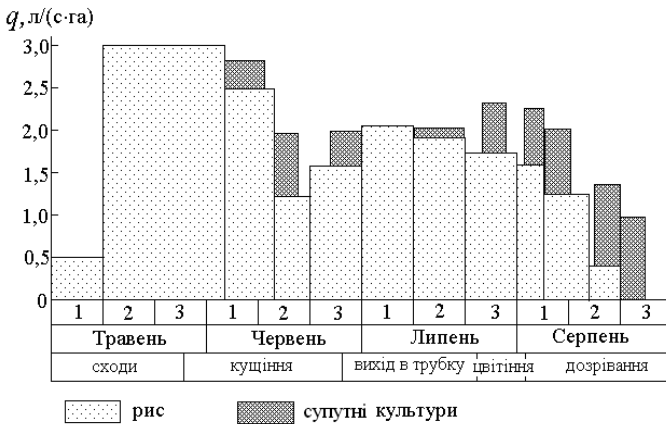
Гідромодуль дренажно-скидного стоку для кожного періоду ( $t$ , діб) визначають за формулою

$$q_{ск} = \frac{S_{np} + S_{ск} + S_{всп}}{86,4 \cdot t}. \quad (12.4)$$

При зрошенні супутніх рису сільськогосподарських культур, що входять до рисової сівозміни, графік гідромодуля для них складають так само, як і для культур з періодичними поливами.

Загальний графік гідромодуля рисової сівозміни є сума графіків гідромодуля рису і супутніх для нього культур.

При укомплектуванні такого графіка намагаються призначити поливи супутніх культур в період зменшеного гідромодуля, щоб не збільшити максимальні значення подачі води.



**Рисунок 12.2 – Графік гідромодуля рисової сівозміни.**

### **Вправа 12.1. Розрахунок режиму зрошення рису**

Дано: 1. Глибина залягання водоупору чи ґрунтових вод під рисовою ділянкою – 1,1 м.

2. Шпаруватість розрахункового шару ґрунту – 54 % від об'єму.

3. Найменша вологемкість розрахункового шару ґрунту – 72 % від шпаруватості.

4. Вихідна вологість ґрунту – 42 % шпаруватості.

5. Випаровування з водної поверхні – 400 мм.

6. Транспірація рису – 310 мм.

8. Кількість атмосферних опадів за період вегетації – 162 мм.

Розподіл випаровування і опадів протягом вегетації, %

Показник	Місяць										
	травень			червень			липень			серпень	
	декада										
	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
Випаровування з водної поверхні	9	11	11	12	12	11	8	9	9	8	
Транспірація рису	-	-	1	3	5	10	15	17	23	26	
Атмосферні опади	8	10	5	10	12	10	15	12	7	11	

Необхідно: 1. Визначити зрошувальну норму рису.

2. Скласти сумарний водний баланс і водні баланси за декадні періоди.

3. Побудувати графік гідромодуля.

#### Розв'язок

В умовах півдня України вирощують, як правило, середньостиглі сорти рису, які висівають до 10 травня, в середньому 1–5 травня, в період, коли середньодобові температури сягають 12 °С. Вегетаційний період рису триває 100–120 діб. Розрахункова середня урожайність складає 40 ц/га.

Водний режим – найважливіша ланка заходів по забезпеченню високого врожаю рису. Рис можна вирощувати з постійним затопленням, при якому затоплення підтримується весь вегетаційний період, і з скороченим, при якому шар води відсутній на початку і в кінці вегетаційного періоду, причому після посіву проводять 1–2 поливи невеликими нормами.

В даній вправі прийнятий скорочений спосіб затоплення (рис. 12.3), так як він зменшує зрошувальну норму, створює сприятливі умови для механізації збирання врожаю і, в той же час, відповідає потребам рису у водному живленні.

Від посіву до повного проростання насіння рису проводять два зволожувальних поливи при поливній нормі 400 м<sup>3</sup>/га. З появою сходів чеки затоплюють шаром води, який збільшують з ростом рису до 15–20 см (в середньому 17 см). Для боротьби з бур'янами шар води доводять до 20–25 см (прийнятий шар 22 см).

На початку кушіння рису 20–25 червня, у відповідності з агротехнічними вимогами, шар води зменшують до 5 см, після чого знову збільшують до 15 см. У період досягнення воскової стиглості рису поля повинні бути осушені (природні витрати води на випаровування і фільтрацію після закінчення подачі води).

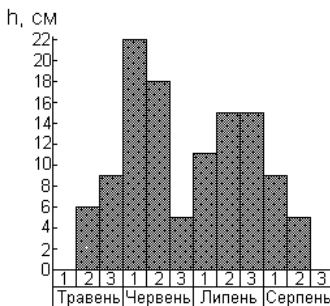


Рисунок 12.3 – Зміна шару води в рисовому чеку

**1. Зрошувальну норму рису** при поливі затопленням визначають на підставі рівняння водного балансу ділянки за формулою О.М. Костякова

$$M = m + H \cdot A(\beta_{max} - \beta_0) + 100 \cdot h + 10 \cdot E_B + 10 \cdot E_{Tp} + S_\phi + S_{Bmp} + S_{Прот} - 10 \cdot P, \quad (12.5)$$

де  $m$  – поливна норма (зволожувальних поливів), яку необхідно подати до затоплення, м<sup>3</sup>/га;

$H \cdot A(\beta_{max} - \beta_0)$  – витрати води на насичення ґрунтового шару  $H$ , м<sup>3</sup>/га;

$H$  – глибина залягання водоупору чи рівня ґрунтових вод під рисовою ділянкою;

$A$  – шпаруватість ґрунту, % від його об'єму;

$\beta_{max}$  – найменша вологоємність ґрунту, % від шпаруватості;

$\beta_0$  – вихідна вологість ґрунту, % від шпаруватості;

$h$  – шар затоплення чеку, см;

$E_B$  – випаровування з водної поверхні мм;

$E_{Tp}$  – транспірація рису, мм;

$S_\phi$  – фільтрація і відтік води із чеку, м<sup>3</sup>/га;

$S_{Прот}$  – проточність води, м<sup>3</sup>/га;

$S_{Bmp}$  – втрати води через валики, м<sup>3</sup>/га;

$P$  – атмосферні опади за вегетаційний період, мм.

Кожну із величин, що входять в рівняння водного балансу необхідно визначати самостійно, незалежно від інших.

Методи визначення цих величин – експериментальні або розрахункові – наведені в спеціальній літературі, причому перевагу необхідно віддавати значенням, отриманим для конкретних об'єктів проєктування.

Об'єм води, який необхідний для насичення ґрунту від поверхні до водоупору, складає

$$W = HA(\beta_{max} - \beta_0) = 1,1 \cdot 54(72 - 42) = 1782 \text{ м}^3/\text{га}.$$

У перший період величина шару води в чеці складає 22 см; потім після скиду її в період куціння рису до 5 см знову збільшується до 15 см (див. рис. 12.3). Отже, величина шару води в чеці за вегетаційний період складає  $h = 22 + 15 - 5 = 32$  см або кількість води, необхідна для створення цього шару, складає 3200 м<sup>3</sup>/га.

Величина випаровування з водної поверхні  $E_B$  складає для розглянутого прикладу – 4000 м<sup>3</sup>/га, транспірації рису  $E_{Tp}$  – 3100 м<sup>3</sup>/га.

Загальна фільтрація  $S_\phi$  складається із вертикальної і горизонтальної. Величина вертикальної фільтрації, визначається на монолітах і дорівнює 0,0014 м/добу, що складає 14 м<sup>3</sup>/га за добу або 1560 м<sup>3</sup>/га за вегетаційний період (112 діб).

Горизонтальну фільтрацію або фільтрацію через валики в скидні канали  $S_{Bmp}$  приймають за даними рисових дослідних станцій в розмірі 0,24 л/(с·га). Витрати води за 112 діб вегетаційного періоду складає  $86,4 \cdot 112 \cdot 0,24 = 2322$  м<sup>3</sup>/га.

Загальна фільтрація складає  $1560 + 2322 = 3882$  м<sup>3</sup>/га.



Проточність  $S_{Прот}$  приймають рівною нулю, так як ґрунти масиву зрошення не засолені, а температура повітря вегетаційного періоду не створює небезпеки перегріву води чека. Крім того, при наявності проточності зрошувальної води на рисові поля атмосферні опади ( $162 \text{ м}^3/\text{га}$ ) не можуть бути використані, так як вони видаляються з рисового чеку разом зі стоками, лише збільшуючи останні.

Після встановлення значень окремих складових, величина зрошувальної норми рису складає

$$M = 800 + 1782 + 3200 + 4000 + 3100 + 3882 - 1620 = 15144 \text{ м}^3/\text{га}.$$

**2. Водний баланс рисового чека.** Для уточнення зрошувальної норми і встановлення розподілу її протягом вегетації складають водні баланси за окремими періодами (табл. 12.2) з визначенням ординат графіка гідромодуля і об'єму води для прийнятих періодів. За розрахунковий період, як правило, приймають декаду.

Для розглянутого прикладу період вегетації прийнято з 1 травня по 31 серпня.

На початку вегетації (перша декада травня) затоплення немає, але необхідно провести два поливи по  $400 \text{ м}^3/\text{га}$  (графа 4).

Насичення шару ґрунту під чеками буде здійснюватися тільки на початку затоплення (приблизно 3 декади), тому витрати води на насичення необхідно розподілити між цими декадами ( $1782 \text{ м}^3/\text{га}$ ).

Випаровування з водної поверхні і транспірацію рису (графи 5 і 6) розподіляють за відсотковим розподілом завдання.

Загальна фільтрація із рисового чека за вегетацію становить  $3882 \text{ м}^3/\text{га}$  і її, як правило, рівномірно розподіляють за всіма декадами вегетації (графа 7).

Шар затоплення чеку (см) залежить від технології вирощування і визначається за рис. 12.3. Об'єм води, необхідний на наповнення чеку визначають за формулою

$$W_{\text{нап}} = 100(h_i - h_{i-1}), \quad (12.6)$$

де  $W_{\text{нап}}$  – об'єм води необхідний на наповнення чеку,  $\text{м}^3/\text{га}$ ;  $h_i, h_{i-1}$  – шар води в чеку відповідно на кінець і початок розрахункової декади, см.

При цьому можуть бути варіанти: (+) наповнення чека; (–) скидання води з чека; (0) – шар води в чеку залишається незмінними протягом декади.

Атмосферні опади подекадно (графа 10) розраховують за типовим розподілом (завдання).

Загальні витрати води за декаду розраховують за формулою

$$W = W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_9 - W_{10}, \quad (12.7)$$

де  $W_4, W_5, W_6, W_7, W_9, W_{10}$  – об'єм води, що відповідає графам табл. 4.2,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

У більшості випадків загальна сума витрат більше 0, тобто необхідно подавати воду в чек (графа 11), і тільки в деякі декади значення  $W$  менше 0, тобто необхідно скидати воду із чеку (графа 12).

Таблиця 1.2.2 – Водний баланс рисового чека

Місяць	Декада	Фаза розвитку рису	Полівні і насичення шару ґрунту, м <sup>3</sup> /га	Витаровування з водної поверхні, м <sup>3</sup> /га	Транспірація рису, м <sup>3</sup> /га	Загальна фільтрація, м <sup>3</sup> /га	Шар води		Атмосферні опади, м <sup>3</sup> /га	Всього внутрішн. водн., м <sup>3</sup> /га	Склад		Загальна ордината гідромодуля, л/(с·га)
							см	м <sup>3</sup> /га			об'єм, м <sup>3</sup> /га	гідромодуль, л/(с·га)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Травень	1	Від сівби	800	-	-	-	-	-	-	800	-	-	0,93
	2	до куцїння	600	360	-	388	6	600	130	1818	-	-	2,10
	3		600	440	-	389	9	300	162	1567	-	-	1,81
Червень	1		582	440	31	388	22	1300	82	2659	-	-	3,08
	2	Куцїння		480	93	388	18	-400	162	399	-	-	0,46
	3			480	155	388	5	-1300	194	-	471	0,55	-
Липень	1	Вихід в		440	310	388	11	600	162	1576	-	-	1,82
	2	дубку і		320	465	388	15	400	243	1330	-	-	1,54
	3	колосїння		360	527	389	15	-	194	1082	-	-	1,25
Серпень	1	Налив та		360	713	388	9	-600	113	748	-	-	0,87
	2	молочна		320	806	388	5	-400	178	1114	-	-	1,29
	3	стиглість		-	-	-	-	-500	-	-	500	0,58	-
Всього			2582	4000	3100	3882		3200	1620	13097	971		-

**3. Графік гідромодуля.** Ординату графіка гідромодуля визначають за формулою

$$q = \frac{W}{86,4 \cdot t}, \quad (12.8)$$

де  $W$  – об’єм води, що подається на зрошувану рисову ділянку за розрахунковий період, м<sup>3</sup>/га;

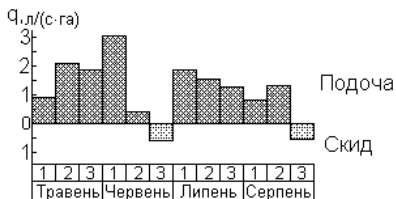
$t$  – тривалість розрахункового періоду, діб.

У даній роботі прийнятий розрахунковий період – декада, тобто  $t=10$  діб.

За даними табл. 12.2 будують графік гідромодуля (рис. 12.4).

Інші культури в рисовій сівозміні слід поливати таким чином і в такі строки, щоб не збільшити максимальної ординати графіку гідромодуля рису.

Розрахункові ординати гідромодуля:



**Рисунок 12.4 – Графік гідромодуля рису**

- максимальна ордината, що відповідає періоду створення шару водив чеках,  $q_{max}=3,08$  л/(с·га);
- мінімальна ордината, що відповідає періоду підтримання шару води в чеках,  $q_{min}=0,46$  л/(с·га);
- максимальна скидна ордината гідромодуля,  $q_{max}=0,58$  л/(с·га).

## 12.2. Проектування режиму зрошення під системи краплинного зрошення

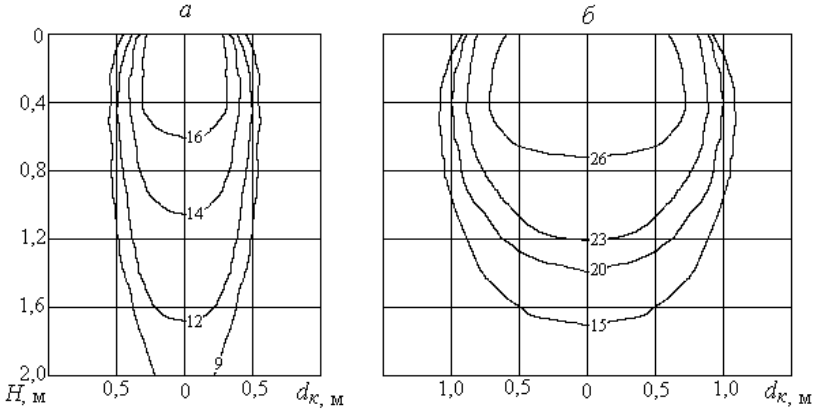
Особливістю краплинного зрошення є те, що зрошення здійснюється не всієї ділянки, а вибірковими осередками навколо рослин. Прогалини між рядками і рослинами залишаються не политими. При цьому йдеться мова про частку площі живлення рослин, тобто відношення площі зрошуваних осередків до загальної зрошуваної площі краплинним способом.

На підставі польових дослідів були встановлені основні закономірності зволоження ґрунту при краплинному зрошенні. Встановлено, що при одній і тій же витраті крапельниць зона зволоження для важких ґрунтів майже в два рази більше, в порівнянні з легкими (Ромащенко М.І., 2015).

На рис. 12.5 наведено розподіл вологості в зоні зволоження через добу після поливу для супіщаного і важкосуглинкового ґрунту.

Розподіл вологи в зоні зволоження через добу після поливу є досить нерівномірним. В центральній частині вологість близька до найменшої вологоємності, а на периферії – до вологості стійкого

в'янення. Аналіз експериментальних даних дозволив встановити, що середня вологість в зоні зволоження після перерозподілу вологи для важких ґрунтів складає 0,90, а для легких – 0,93 від найменшої вологості. Глибина промочування конкретного типу ґрунту залежить від вихідного розподілу вологи по вертикалі під крапельницею і тривалості поливу, тобто від об'єму водопадачи.



**Рисунок 12.5 – Розподіл вологи в зоні зволоження і її контури при витраті крапельниці 10 л/год:** а – супіщаний ґрунт; б – важкосуглинковий; *H* – глибина, м; *d<sub>к</sub>* – діаметр зони зволоження (цифри біля кривих – вологість, % від абсолютно сухого ґрунту)

Частка площі живлення рослин, що підлягає зволоженню, залежить від кліматичної зони, а також виду сільськогосподарських культур, що вирощують при цьому способі поливу. Частка площі живлення рослин, що підлягає зволоженню, для Лісостепу повинна бути в межах 0,20–0,15, Північного Степу – 0,30–0,20, Південного Степу – 0,50–0,30, а аридної зони – 1 (ДСТУ 7596:2014).

При застосуванні окремих крапельниць-водовипусків (полив саду) частку площі, що підлягає зволоженню, розраховують за формулою

$$S = \frac{n \cdot w_k}{a \cdot b}, \tag{12.9}$$

де *n* – кількість крапельниць біля однієї рослини;

*w<sub>к</sub>* – площа зволоження однією крапельницею, м<sup>2</sup>;

*a* – відстань між рослинами в ряду, м;

*b* – відстань між рядами, м.

Знаючи кількість крапельниць на 1 га частку живлення рослин можна знайти за формулою

$$S = \frac{N_k w_k}{10000}, \quad (12.10)$$

де  $N_k$  – кількість крапельниць на 1 га:

$$N_k = N_p \cdot n, \quad (12.11)$$

де  $N_p$  – кількість рослин на 1 га:

$$N_p = \frac{10000}{a \cdot b}. \quad (12.12)$$

Для однорідних ґрунтів  $w_k$  можна прийняти за табл. 12.3 (Ромащенко М.І., 2007).

**Таблиця 12.3. Площа зволоження однією крапельницею, залежно від її витрати і типу ґрунту,  $w, м^2$  (Ромащенко М.І. 2015)**

ґрунти за гранулометричним складом (тип)	Витрата крапельниці, л/год				
	2	4	6	8	10
Піщані	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2
Супіщані	0,6	0,8	1,0	1,4	1,9
Середні суглинки	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
Важкі суглинки	1,0	1,5	2,0	2,4	3,2
Глинисті ґрунти	1,2	1,8	2,4	3,2	4,0

Площу живлення однією крапельницею можна знайти через діаметр її зволоження (рис. 12.6).

При застосуванні поливних стрічок, для зволоження, смуги частку площі живлення визначають за формулою

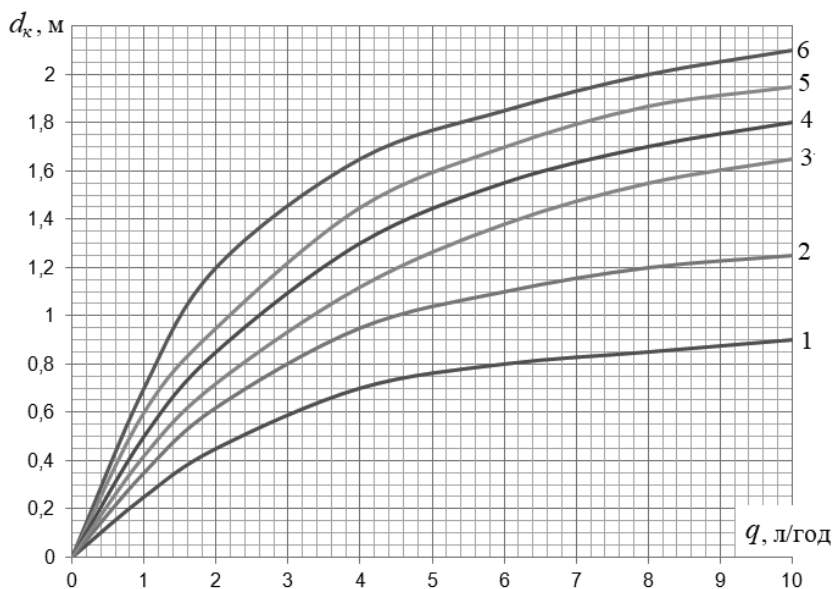
$$S = \frac{l}{b}, \quad (12.13)$$

де  $l$  – ширина площі смуги зволоження поливною стрічкою, м:

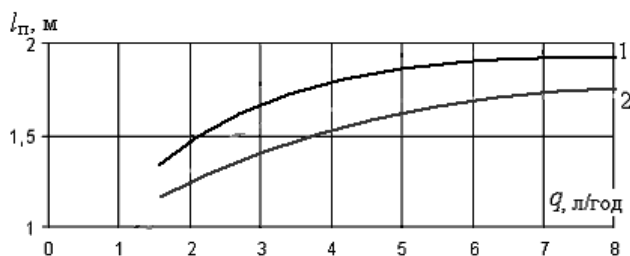
$b$  – відстань між поливними стрічками, м.

Ширина смуги зволоження при поливі емітерними лініями дещо більша через те, що відбувається взаємний вплив окремих водовипусків. На рис. 12.7 наведена залежність ширини смуги зволоження емітерної лінії на глибині 30 см від витрати водовипусків, а також залежність діаметру зволоження окремо розташованої крапельниці-водовипуска від його витрати. Вологість ґрунту перед поливом – біля 75 % найменшої вологості.

Для зрошення вибирають крапельниці чи емітерні стрічки, що дозволяють зволожити необхідну частку площі живлення рослин.



**Рисунок 12.6 – Залежність діаметра зони зволоження  $d_k$  від витрати крапельниці  $q$ : 1 – підцані; 2 – супідцані; 3 – легкі суглинки; 4 – середні суглинки; 5 – важкі суглинки; 6 – глинисті ґрунти (Ромащенко М.І. 2015).**



**Рисунок 12.7 – Залежність ширини смуги зволоження ( $l$ ) емітерною лінією (1) і діаметра зони зволоження окремо розташованої крапельниці-водовипуску (2) від витрати водовипуску ( $q$ ) (Ромащенко М.І. 2007).**

### Приклад 12.1.

Визначити частку площі живлення яблуневого саду, зволожуваного краплинним способом на важкосуглинкових ґрунтах, якщо витрата окремої крапельниці-водовипуску 2 л/год, крапельниці розміщені по 2 шт. на одне дерево. Яблуні в саду вирощують за схемою 3×4 м.

*Розв'язок*

Діаметр контуру зволоження однією крапельницею, відповідно до рис. 12.6, для крапельниці-водовипуска з витратою 2 л/год на важкосуглинкових ґрунтах складає 1,1 м. Якщо прийняти контур зволоження в плані у вигляді кола, то площа зволоження складатиме  $w_k = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,1^2}{4} = 0,95 \text{ м}^2$ , що є близьким до значень, наведених в табл. 12.3, де  $w_k = 1,0 \text{ м}^2$ .

За формулою (12.9)  $S = \frac{n \cdot w_k}{a \cdot b} = \frac{2 \cdot 1}{3 \times 4} = 0,17$ , тобто тільки 17 % всієї території зрошується.

### Приклад 12.2.

Визначити частку площі живлення ділянки, зайнятої томатами, що вирощують на важкосуглинкових ґрунтах, якщо полив здійснюють емітерними стрічками Т-Таре TSX 508-30-250, а відстань між стрічками 1,4 м.

#### Розв'язок

Розрахунки краще проводити на 100 м поливної стрічки. Емітери розташовані через кожні 30 см, витрата на 100 м стрічки складає 250 л/год., тоді витрата одного емітера  $q = \frac{250 \cdot 0,3}{100} = 0,75 \text{ л/год.}$

За рис. 12.7 ширина смуги зволоження ( $l$ ) складає 0,5 м. Частка площі живлення зволожується поливною стрічкою, відповідно до формули (12.13) складає  $S = \frac{l}{b} = \frac{0,5}{1,4} = 0,357$  або 35,7 % площі.

### Приклад 12.3.

Підібрати оптимальну витрату водовипусків емітерної стрічки для поливу помідор в північному Степу України на важких суглинках, якщо відстань між поливними стрічками 1,4 м.

#### Розв'язок

У відповідності до ДСТУ 7596:2014 для Північного Степу оптимальна частка площі живлення рослин, що зволожують краплинним способом знаходиться в межах від 0,2 до 0,3; середнє значення 0,25.

З формули (12.13) знаходимо ширину смуги зволоження  $l = S \cdot b = 0,25 \cdot 1,4 = 0,35 \text{ м}$ . За графіком (рис. 12.6) для зони зволоження витрата емітера повинна бути 0,25 л/год. В розрахунку на 100 м поливної стрічки витрата складе  $Q_{100} = \frac{100}{a} q = \frac{100}{0,30} 0,25 = 83,3 \text{ л/год/100 м}$ .

Поливну норму при краплинному зрошенні,  $\text{м}^3/\text{га}$ , визначають за формулою, подібною до формули О.М. Костякова (7.4)

$$m = 100 \cdot \gamma \cdot h \cdot S \cdot (r\beta_{HB} - \beta_{min}), \quad (12.14)$$

де  $\gamma$  – щільність кореневмісного активного шару ґрунту;

$h$  – глибина активного кореневмісного шару ґрунту;  
 $S$  – частка площі живлення крапельниць-водовипусків або емітерів;  
 $r$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність зони краплинного зволоження, який зазвичай приймають 0,95;  
 $\beta_{HB}$  – вологість кореневмісного шару при НВ;  
 $\beta_{min}$  – передполивна вологість ґрунту (приймають як частку від НВ)

$$\beta_{min} = \lambda \cdot \beta_{HB}, \quad (12.15)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт передполивної вологості ґрунту, що відповідає нижній межі оптимального зволоження, в частках від одиниці.

#### Приклад 12.4.

Розрахувати поливну норму для помідорів, при краплинному зрошенні, якщо глибина кореневмісного шару ґрунту 0,7 м, щільність ґрунту 1,25 г/см<sup>3</sup>, вологість при НВ 29,5 %, коефіцієнт передполивної вологості 0,8 від НВ, частка площі живлення рослин 0,25.

Розв'язок

Розрахунок ведемо за формулами (12.14) і (12.15)

$$\beta_{min} = 0,8 \cdot 29,5 = 23,6 \%,$$

$$m = 100 \cdot 1,25 \cdot 0,7 \cdot 0,25 \cdot (0,95 \cdot 29,5 - 23,6) = 96,8 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Отже, поливну норму помідорів для наведених умов приймають 96,8 м<sup>3</sup>/га.

Графік поливів будують для встановлення послідовності проведення поливів на декількох зрошуваних ділянках. Він ефективний тоді, коли на цих ділянках проводять поливи декількох сільськогосподарських культур.

Тривалість поливу розраховують за формулою

$$t = \frac{1000 \cdot m}{\eta \cdot q_0 \cdot N_k}, \quad (12.16)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт використання води;

$q_0$  – витрата крапельниці, л/год.;

$N_k$  – кількість крапельниць на 1 га.

При використанні окремих крапельниць (наприклад, полив саду) кількість крапельниць на 1 га  $N_k$  визначають за формулами (12.11), (12.12). При застосуванні поливних стрічок, коли створюється суцільна смуга зволоження кількість крапельниць  $N_k$  розраховують за формулою.

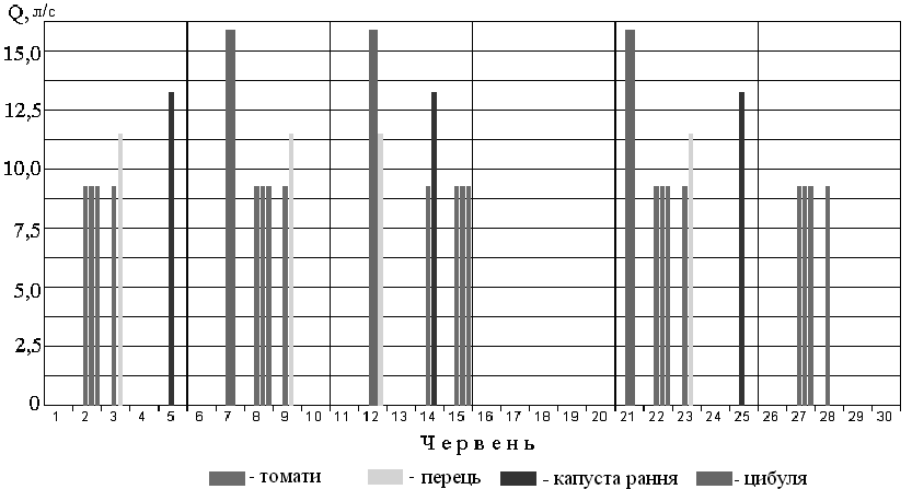
$$N_k = \frac{10000}{a \cdot b}, \quad (12.17)$$

де  $b$  – відстань між поливними трубками, м;



$a$  – відстань між мікродовивушками (емітерами) в поливній стрічці, м.

Тривалість поливу однієї зрошуваної ділянки, як правило, складає декілька годин. Отже, в один день можна полити декілька ділянок послідовно. В зв'язку з цим графік поливів будують не за днями, як при інших способах поливу, а погодинно. Як приклад, на рис. 12.8. показаний такий графік поливу овочевої сівозміни за червень.



**Рисунок 12.8.** Графік поливу овочевої сівозміни в червні  
( $p=85\%$ , МС Дніпро)

### Приклад 12.5.

Побудувати графік поливів овочевої сівозміни, якщо задані строки і норми поливу окремих культур (табл. 12.4). Структура сівозміни така: томати займають 4 ділянки; перець – 1; капуста рання – 1 і цибуля – 2. Для поливу застосовують поливну стрічку Aqua TraXX ERA5XX1234, з витратою одного емітера 0,86 л/год (відстань між емітерами 30 см). Відстань між поливними трубками для томатів 1,2 м; перцю і капусти – 0,9; цибулі – 0,7.

Розв'язок

Для побудови графіку поливів складають відомість поливів (табл. 12.4).

Кількість крапельниць на 1 га розраховують за формулою (12.17) і для помідор вона складає  $N_{\kappa} = \frac{10000}{1,2 \cdot 0,3} = 27777$  шт.

Тривалість поливу визначають за формулою (12.16) і для помідор вона складає  $t = \frac{1000 \cdot 129}{0,9 \cdot 0,86 \cdot 27777} = 6$  год.

Дату поливу призначають за інтегральними кривими дефіцитів водоспоживання, іншим способом.

Поливному витрату визначають виходячи із витрати одного емітера і їх кількості. Тоді, для помідор  $Q = \frac{q_0 \cdot N_K \cdot F}{3600} = \frac{0,86 \cdot 2777 \cdot 0,38}{3600} = 9,16$  л/с.

За даними відомості (табл. 12.4) будують графік поливів і уточнюють час поливу так, щоб поливи не співпадали і максимальна витрата була б найменшою (див. рис. 12.8).

Графік поливу побудований таким чином, щоб одночасно проводився полив тільки на одній зрошувальній ділянці. Цього можна досягти зміщенням дат і часу поливу на невеликий період (до 1 доби). Так як тривалість поливу на зрошуваних ділянках досить велика, то за один день можна полити максимум 3 ділянки. Так як томати займають 4 ділянки, то при плануванні поливів три поливають в призначений день, а ще одну – на день пізніше, або раніше.

За графіком дуже важко визначити конкретно час поливу, тому для зручності складають додаткову відомість, де чітко проставляють дату і час поливу (табл. 12.5).

Якщо полив планується тільки на одній ділянці, то максимальна витрата на систему дорівнює ділянковій витраті з найбільшим значенням. Так для розглянутого прикладу максимальна витрата складає 15,4 л/с. При цьому максимальний гідромодуль складе

$$q_{max} = \frac{Q_{max}}{F} = \frac{15,4}{11,01} = 1,40 \text{ л/(с·га)}.$$

Отриманий гідромодуль значно більше нормативного, тому для його зменшення необхідно збільшити кількість зрошуваних ділянок, зменшивши їх площу.

Середньовиважена зрошувальна норма за поливний сезон дорівнює середньовиваженій нормі за вегетаційний період плюс норма вологозарядкових поливів. Так як, вологозарядкові поливи в даному прикладі не планувались, то середньовиважена норма складає

$$M_{сер.зв} = \frac{1935 \cdot 1,38 \cdot 4 + 1143 \cdot 1,35 + 762 \cdot 1,44 + 1190 \cdot 1,35 \cdot 2}{11,01} = 1502 \text{ м}^3/\text{га}.$$

**Таблиця 12.4 – Відомість графіку поливів овочевої сівозміни**

№ ділянки	Сільськогосподарська культура	Зрошувана площа, га	Кількість крапельниць на 1 га	Частка площі живлення	Зрошувальна норма, м <sup>3</sup> /га	№ поливу	Поливна норма, м <sup>3</sup> /га	Тривалість поливу, год	Дата поливу	Поливна витрата, л/с
1-4	Помідор	1,38	27777	0,25	1935	1	129	6,0	20.05	9,16
						2	129	6,0	26.05	
						3	129	6,0	2.06	
						4	129	6,0	8.06	
						5	129	6,0	15.06	
						6	129	6,0	22.06	
						7	129	6,0	27.06	
						8	129	6,0	6.07	
						9	129	6,0	18.07.	
						10	129	6,0	26.07	
						11	129	6,0	2.08	
						12	129	6,0	8.08	
						13	129	6,0	14.08	
						14	129	6,0	20.08	
						15	129	6,0	28.08	
5	Перець	1,35	37037	0,33	1143	1	127	4,3	20.05	11,9
						2	127	4,3	2.06	
						3	127	4,3	9.06	
						4	127	4,3	12.06	
						5	127	4,3	23.06	
						6	127	4,3	18.07	
						7	127	4,3	28.07	
						8	127	4,3	5.08	
						9	127	4,3	14.08	
6	Капуста рання	1,44	37037	0,33	762	1	127	4,3	30.04	12,7
						2	127	4,3	3.05	
						3	127	4,3	25.05	
						4	127	4,3	5.06	
						5	127	4,3	15.06	
						6	127	4,3	25.06	
7, 8	Цибуля	1,35	47619	0,46	1190	1	170	4,6	18.05	15,4
						2	170	4,6	8.06	
						3	170	4,6	12.06	
						4	170	4,6	22.06	
						5	170	4,6	1.07	
						6	170	4,6	7.08	
						7	170	4,6	11.08	
<b>Разом</b>		11,01								

**Таблиця 12.5 – Строки поливів (червень)**

Сільськогосподарська культура	№ ділянки	№ поливу	Дата поливу	Час		Тривалість, години
				початок	кінець	
Томат	1	3	2.06	7:00	13:00	6
	2	3	2.06	13:00	19:00	6
	3	3	2.06	19:00	01:00	6
	4	3	3.06	7:00	13:00	6
	1	4	8.06	7:00	13:00	6
	2	4	8.06	13:00	19:00	6
	3	4	8.06	19:00	01:00	6
	4	4	9.06	7:00	13:00	6
	1	5	14.06	7:00	13:00	6
	2	5	15.06	7:00	13:00	6
	3	5	15.06	13:00	19:00	6
	4	5	15.06	19:00	01:00	6
	1	6	22.06	7:00	13:00	6
	2	6	22.06	13:00	19:00	6
	3	6	22.06	19:00	01:00	6
	4	6	23.06	7:00	13:00	6
	1	7	27.06	7:00	13:00	6
	2	7	27.06	13:00	19:00	6
	3	7	27.06	19:00	01:00	6
	4	7	28.06	7:00	13:00	6
Перець	5	2	3.06	13:00	17:20	4,3
	5	3	9.09	13:00	17:20	4,3
	5	4	12.06	17:20	21:40	4,3
	5	5	23.06	13:00	17:20	4,3
Капуста рання	6	4	5.06	8:00	12:20	4,3
	6	5	14.06	13:00	17:20	4,3
	6	6	25.06	8:00	12:20	4,3
Цибуля	7	2	7.06	8:00	12:40	4,6
	8	2	7.06	12:40	17:20	4,6
	7	3	12.06	8:00	12:40	4,6
	8	3	12.06	12:40	17:20	4,6
	7	4	21.06	8:00	12:40	4,6
	8	4	21.06	12:00	17:20	4,6

### **12.3. Поливний режим зрошуваних культурних пасовищ**

На одиницю сухої маси лукопасовищні трави витрачають значно більше вологи, ніж інші сільськогосподарські культури. Висока потреба у волозі зумовлена надто великою випаровуючою листовою поверхнею через велику щільність травостою, а також тривалою життєдіяльністю листя.

При нестачі вологи дуже послаблюється або зовсім припиняється куціння травостою, що негативно впливає на динаміку нагромаджен-

ня рослинної маси. Для нормального кушіння оптимальна вологість ґрунту повинна становити 70–80 % НВ.

Дефіцит вологи у ґрунті не лише затрудняє формування нових пагонів з бруньок, але й дуже затримує ріст наявних.

Виявлено, що завдяки достатньому забезпеченню багаторічних трав водою і азотом вони інтенсивно утворюють пагони протягом всієї вегетації. Це особливо важливо влітку, коли через нестачу вологи в ґрунті злаки майже не кущаться, уповільнюється їх відростання. Тому в цей час пасовища особливо потребують поливу. Ступінь вологозабезпеченості дернини може стати вирішальним фактором для продуктивності пасовища в літній період і формування врожаю на наступні роки.

У всіх ґрунтово-кліматичних зонах України, навіть на Поліссі, де сума атмосферних опадів сягає 500–600 мм, ефективність зрошення культурних пасовищ – безперечна. Кожен четвертий рік і більше половини місяців за вегетацію на Поліссі недостатньо забезпечені вологою, а то й посушливі. Крім того, навесні і влітку бувають періоди, коли випаровування значно перевищує суму атмосферних опадів, які призводять до пересихання ґрунту й зниження продуктивності травостоїв.

Ще більша потреба у зрошенні пасовищ у Лісостепу і, особливо, в Степу, де сума атмосферних опадів у середньому за рік становить відповідно 500–550 мм і 400–450 мм, з яких понад 22 % витрачається на поверхневий і підземний стік. Протягом року опади розподіляються нерівномірно, що негативно позначається на відростанні трав. У цих зонах нестачу зелених кормів можна поповнити за рахунок створення високопродуктивних зрошуваних пасовищ на заплавах луках, схилах балок, а також у кормових сівозмінах.

Поливний режим культурного пасовища відрізняється від режиму сільськогосподарської культури сівозмінних ділянок тим, що пасовища протягом вегетаційного періоду випасаються кілька разів, тому водоспоживання їх значно коливається, досягаючи максимуму у період бутонізації і мінімуму у перші дні після випасання. Виходячи з цього, поливи культурних пасовищ рекомендується суміщувати з відростанням травостою.

Коренева система травосуміші поширюється на глибину 0,6–0,7 м і більше, проте основна маса перебуває у шарі 0,3–0,4 м, де відбуваються найбільші коливання запасів вологи. Тому, при визначенні по-

ливних норм, глибину розрахункового шару ґрунту приймають 0,4 м. Розміри поливних норм при цьому становлять 300–400 м<sup>3</sup>/га.

Тривалість вегетаційного періоду співпадає з датами переходу середньобагаторічних температур повітря через +5 °С весною і восени.

Початок і кінець випасання не співпадають з цими періодами. До початку пасовищного періоду висота травостою повинна становити 10–15 см. Тому початок періоду випасання починається через дві декади після початку вегетаційного періоду. Пасовищний період рекомендується закінчувати за 3–4 тижні до закінчення вегетаційного періоду травостою.

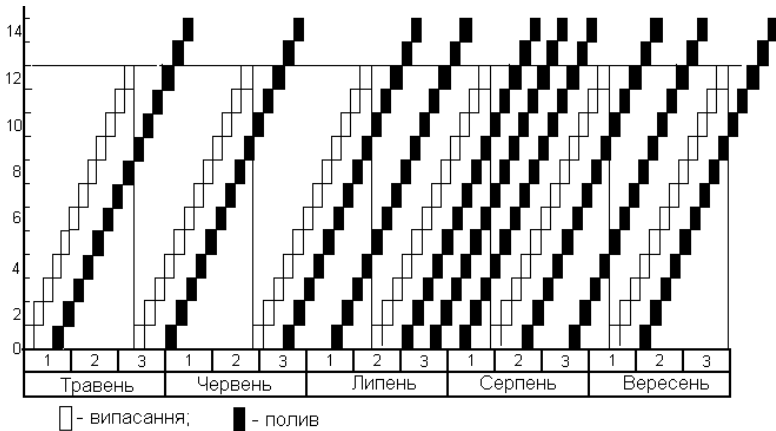
Навесні поливи можна розпочинати при температурі повітря не нижче 15–17 °С, оскільки у холоднішу погоду вони призводять до зниження врожаю трав. Ранньовесняні поливи доцільні, якщо вода тепліша ґрунту.

Восени, для підвищення морозостійкості трав, необхідний вологозарядковий полив, який для Лісолукової і Лісостепової зон сягає 600–800 м<sup>3</sup>/га, а для степової зони і зони напівпустель – 800–1000 м<sup>3</sup>/га. Ці додаткові запаси вологи у ґрунті сприяють також активному росту пасовищних трав восени і зменшують потребу у поливній воді, а також кількість поливів протягом вегетації.

**Таблиця 12.6 – Режим зрошення пасовищ у різних природних зонах України**

Зона або підзона	Період вегетації трав, днів	Сумарне водоспоживання, м <sup>3</sup> /га	Зрошувальна норма, м <sup>3</sup> /га	Поливна норма, м <sup>3</sup> /га	Кількість поливів	
					всього	за цикл випасання
Лісолукова	150–170	4000–6000	800–1600	300–400	2–5	1–2
Лісостепова	160–180	5500–7000	1600–3000	400–500	5–7	1–2
Степова	180–200	6500–8500	3100–5500	400–600	7–10	1–3
Напівпустельна	190–220	7500–10000	5600–7500	500–700	10–12	2–3

При складанні графіків поливу необхідно враховувати періоди відростання та випасання (рис. 12.9).



**Рисунок 12.9 – Приблизний графік поливів і випасання**

При встановленні строків поливу враховують такі основні вимоги:

- тривалість циклу випасання приймають 20–30 днів;
- випасання худоби у кожному загоні за один цикл повинно тривати 2,0–2,5 дні;
- на проведення робіт за доглядом за травостоєм (підкошування трав, розрівнювання екскрементів, внесення добрив, якщо вони не вносяться при поливі) відводиться 1–2 дні;
- випасання худоби дозволяти через 5–6 днів після поливу.

За час відновлення травостій повинен зміцнити і набути необхідного опору витоптуванню. При внесенні добрив випасання худоби дозволяється лише через 10–13 днів.

**Вправа 12.2. Організація і техніка поливу зрошуваного культурного пасовища**

Дано: 1. Кількість голів худоби в гурті – 210.

2. Тривалість відростання травостою – 24 доби.

3. Тривалість випасання в загоні – 2 доби.

4. Поливна норма – 400 м<sup>3</sup>/га.

5. Період використання пасовища – з 1 травня до 30 вересня.

6. Розрахунковий сумарний дефіцит водоспоживання – 400 мм.

**Таблиця 12.7 – Розподіл дефіциту водоспоживання за місяцями**

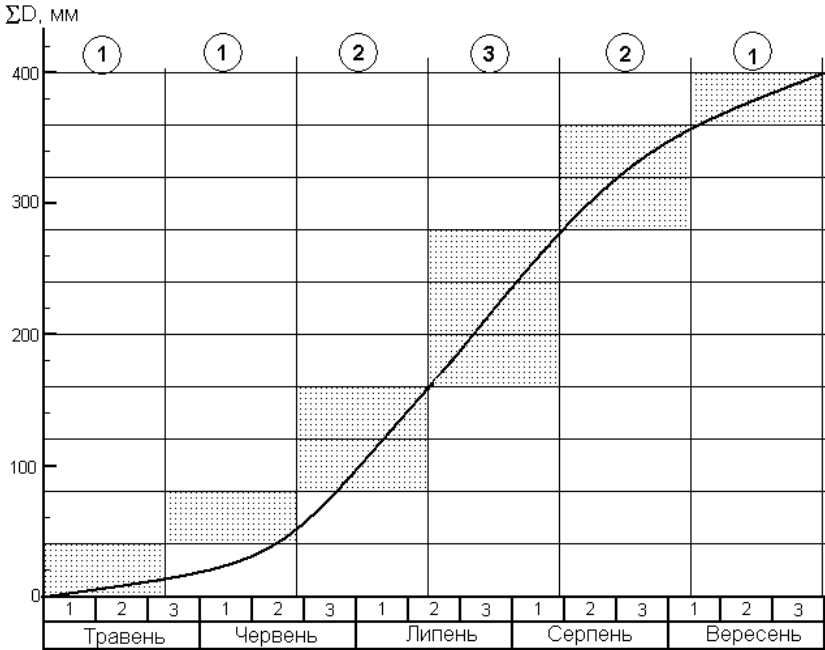
Параметр	Місяць				
	травень	червень	липень	серпень	вересень
Дефіцит водоспоживання, мм	12	88	132	128	40
Інтегральна крива дефіцитів водоспоживання, мм	12	100	232	360	400

Необхідно: 1 Розрахувати режим зрошення і побудувати графік поливу.

*Розв'язок*

Строки поливів повинні узгоджуватись із строками випасання. Розрив між кінцем поливу і початком випасання повинен бути не менше 6 діб, а між кінцем випасання і початком поливу – не менше 4 діб (залежно від складу трав строки можуть бути змінені).

Режим зрошення встановлюють з врахуванням дефіциту водоспоживання за інтегральною кривою (рис. 12.10), побудованою за розрахунками, наприклад, за методом А.М. та С.М. Алпатєвих.



**Рисунок 12.10 – Інтегральна крива дефіциту водоспоживання для встановлення строків і норм поливу культурного пасовища**

Сумарний дефіцит водоспоживання за вегетаційний період травостою ( $\Sigma d$ ) складає 400 мм, або 4000 м<sup>3</sup>/га (відповідно до завдання). Дефіцит водоспоживання повинен компенсуватись зрошувальною нормою ( $M$ ), прийнятою за значенням дефіциту

$$M = \Sigma D = 4000 \text{ м}^3/\text{га}.$$

При польовій нормі  $m=400 \text{ м}^3/\text{га}$  загальна кількість поливів складає

$$n_{\text{пол}} = \frac{M}{m} = \frac{4000}{400} = 10 \text{ шт.}$$



Строки поливів з використанням кривої дефіциту водоспоживання визначають графічно таким чином.

Інтегральну криву, що відповідає  $\sum D$ , ділять по вертикалі на кількість поливів ( $n_{пол}$ ) із заданою нормою  $m$  (в розглянутому випадку  $n_{пол}=10$ ,  $m=40$  мм). Кожна поливна норма ( $m_1, m_2, \dots, m_{10}$ ) компенсує відповідний дефіцит водоспоживання ( $D_1, D_2, \dots, D_{10}$ ) за певний період. Щоб не допустити дефіциту, поливи необхідно здійснювати не пізніше початку його виникнення.

Для визначення строків поливу графічним шляхом криву дефіциту водоспоживання перетинають горизонтальними лініями, відстань між якими відповідає певним вимогам (див. рис. 12.10). Початок періоду з дефіцитом компенсується поливом (точка перетину кривої з нижньою частиною стрічки, що відповідає поливній нормі) і буде крайнім строком поливу.

Строки поливів, встановлені за графіком з використанням сумарного дефіциту водоспоживання, ув'язують зі строками випасання.

Загальна кількість відростань травостою (циклів випасань) на пасовищі складає

$$n_{ц} = \frac{T_{нас}}{T_0} = \frac{153}{24} = 6.$$

де  $T_{нас}$  – тривалість використання пасовища (з 1 травня до 30 вересня, тобто 153 дні).

На горизонтальній осі відмічають шість циклів і на цій підставі встановлюють кількість поливів для кожного циклу. Строки поливів після початку циклу (випасання) і перед ним уточнюють у відповідності до таких рекомендацій:

- перший полив необхідно проводити не раніше, ніж через 4–6 діб після випасання;
- останній полив необхідно проводити не пізніше, ніж за 6–8 діб до наступного випасання;
- якщо необхідно здійснити три поливи, середній призначають рівномірно між першим і останнім.

Потім складають уточнений графік поливів, ув'язаний зі строками випасання (див. рис. 12.9).

Крім основних, необхідно поливати два сіножатних заgonи, для яких прийнятий аналогічний режим зрошення. Насамперед визначають кількість діб, необхідних для поливу цих заgonів.

## 12.4. Особливості поливного режиму стічними водами

Поливний режим сільськогосподарських культур, які вирощують на землеробських полях зрошення (полях на яких ведуться поливи стічними водами), має свої особливості. При його встановленні враховують таке:

- вода як фактор, що забезпечує ріст, розвиток і необхідне зволоження ґрунту;
- наявність у стічних водах поживних речовин;
- вміст мінеральних солей – хлоридів, сульфатів, карбонатів тощо, надлишок яких є загрозою засолення ґрунту і знижує його родючість;
- токсичність елементів і сполук, що містяться в стічних водах у результаті скидання промислових стоків.

Цілорічний цикл зрошення на землеробських полях зрошення складається з двох періодів: вегетаційного і без вегетаційного, завершення якого зводиться не тільки до зарядки вологою, але і внесення поживних речовин, що містяться у стічних водах. Таке зрошення називають удобрювальним. Проводять його переважно взимку. При цьому використовують неосвітлені стоки, які мають високу концентрацію елементів живлення органічних речовин. У вегетаційний період поливами, як правило, задовольняється потреба культур, в основному, у воді. Концентрація речовин у поливній воді має бути допустимою.

Норми і строки поливу стічними водами визначають не тільки біологічними особливостями і потребою культур в удобрювальному зволоженні, але й необхідністю забезпечення безперервного приймання і розподілу води на землеробських полях зрошення.

Зрошувальну норму ( $M$ ) за рік визначають залежно від вмісту основних елементів живлення (азоту, фосфору і калію) в стічній воді за формулами

$$M_N = \frac{1000 \cdot N}{a \cdot \alpha}; M_P = \frac{1000 \cdot P}{\phi \cdot \beta}; M_K = \frac{1000 \cdot K}{\kappa \cdot \gamma}, \quad (12.18)$$

де  $M_N$ ,  $M_P$ ,  $M_K$  – зрошувальні норми за рік для забезпечення сільськогосподарських культур відповідно азотом, фосфором і калієм, м<sup>3</sup>/га;

$N$ ,  $P$ ,  $K$  – норми внесення азоту, фосфору і калію під задану культуру при плановій урожайності, кг/га;

$a$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  – вміст азоту, фосфору і калію в стічній воді, мг/л;

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – коефіцієнти використання азоту, фосфору і калію, що містяться в стічних водах (в середньому для розрахунку приймають коефіцієнти використання азоту і фосфору 0,6–0,7 і калію – 0,6).

Величину зрошувальної норми за рік визначають за тим елементом живлення, який міститься у максимальній кількості в стічній во-

ді, тобто поливна норма, розрахована за формулою (12.18) є мінімальною. У господарсько-побутових водах основним елементом є азот; стоки свинарських комплексів, стічні води цукрових заводів у максимумі містять калій.

Якщо величина річної зрошувальної норми у зв'язку з високою удобрювальною цінністю стічних вод виявляється менше зрошувальної норми, розрахованої за дефіцитом водоспоживання, то різницю необхідно забезпечити, якщо є можливість, подачею чистої води.

Річне навантаження стічних вод розподіляють на *безвегетаційну* і *вегетаційну* зрошувальну норми. Безвегетаційна норма, як правило, видається за один полив і величина її не повинна перевищувати вологості 1,5–2,0-метрового шару ґрунту. У зв'язку з тим, що цей полив проводять взимку, при розрахунках величини поливної норми враховують і тепло стічних вод, необхідне для повного танення мерзлого ґрунту. Проведення зимового поливу в два етапи небажане. Повторні зимові поливи у зв'язку з високою температурою води створюють кригу, яка сповільнює проникненню води в ґрунт. Крім того цей додатковий шар криги, затримує на 10–15 днів строки ранньовесняного обробітку ґрунту і сівби.

Полівна норма сільськогосподарських культур на землеробських полях зрошення повинна відповідати потребам рослин у воді, елементах живлення і визначається водозатримними і самоочищуючими властивостями ґрунту. Норма навантаження стічних вод не повинна перевищувати 5–20 м<sup>3</sup>/га за добу.

Режим зрошення сільськогосподарських культур стічними водами відрізняється від їх зрошення природними водами тривалістю міжполивного періоду, який за санітарними правилами повинен становити 14–15 днів, цього часу достатньо для загибелі бактерій та інших мікроорганізмів.

Величина поливної норми вегетаційних поливів господарсько-побутовими чи змішаними стічними водами змінюється від 200 до 500 м<sup>3</sup>/га, а при поливах тваринницькими стоками – від 120 до 240 м<sup>3</sup>/га. Малі поливні норми сприяють доброму використанню поживних речовин, що містяться в стічній воді, а також кращому їх знешкодженню.

### **Вправа 12.3 – Розрахунок режиму зрошення на зрошуваних полях землеробства**

Дано: 1. Основний вид тварин на тваринницькому комплексі – свині на відгодівлі.  
2. Поголів'я тварин – 2000 голів.

3. Основна вирощувана сільськогосподарська культура – кукурудза на силос.
4. Проектна урожайність – 600 ц/га.
6. Кратність розбавлення тваринницьких екскрементів – 20.

Необхідно: 1. Розрахувати прогнозу добову кількість виходу поживних речовин (N, P, K).

2. Розрахувати зрошувальну норму, виходячи із удобривальної цінності тваринницьких стоків.
3. Визначити потрібну площу землеробських полів зрошення.

#### Розв'язок

**1. Добовий вихід екскрементів від однієї тварини** орієнтовно можна визначити за табл. 12.8, для свиней на відгодівлі він коливається в межах 3,5–6,6 кг. Для розглянутого прикладу приймаємо 5 кг від однієї тварини.

**Таблиця 12.8 – Добовий вихід екскрементів (кг) від однієї тварини**  
(Посібник до ВБН 46/33-2.5-5.85)

Вид тварин	Добовий вихід екскрементів, кг
Бики	40
Корови	55
Телята	75
Свиноматки	8,8-15,3
Кабани	11,1
Поросята	2,4
Свині на відгодівлі і ремонтний молодняк	3,5-6,6

Вміст поживних речовин (N, P, K) відповідно до табл. 12.9 складає: азоту – 0,51 %, фосфору – 0,22 %; калію – 0,46 % від загального об'єму стоків.

**Таблиця 12.9 – Приблизний хімічний склад екскрементів тварин, % від загального об'єму стоків** (Посібник до ВБН 46/33-2.5-5.85)

Вид тварин	H <sub>2</sub> O	N	P	K
Свині	90,3	0,51	0,22	0,46
Велика рогата худоба	86,7	0,38	0,13	0,22

Можлива кількість поживних речовин (N, P, K) в стоках однієї тварини

$$N = \frac{M_c \cdot P_N}{100} = \frac{5 \cdot 0,51}{100} = 0,0255 \text{ кг,}$$

$$P = \frac{M_c \cdot P_P}{100} = \frac{5 \cdot 0,22}{100} = 0,011 \text{ кг,}$$

$$K = \frac{M_c \cdot P_K}{100} = \frac{5 \cdot 0,46}{100} = 0,023 \text{ кг.}$$

Прогнозна кількість поживних речовин (N, P, K) в стоках 2000 голів свиней буде складати

$$N = 0,0255 \cdot 2000 = 51 \text{ кг/добу або } 18,1 \text{ т/рік,}$$

$$P = 0,011 \cdot 2000 = 22 \text{ кг/добу або } 8,03 \text{ т/рік,}$$

$$K = 0,23 \cdot 2000 = 46 \text{ кг/добу або } 16,8 \text{ т/рік.}$$

**2. Зрошувальну норму**, тобто кількість води, що необхідно подати на 1 га протягом вегетаційного періоду, визначають залежно від сільськогосподарської культури і погодних умов, наприклад, методом ФАО, А.М. та А.С. Алпатьєвих, О.М. Костякова, В.П. Остапчика чи ін. В даній роботі пропонується зрошувальну норму прийняти, як водозберігаючу за ДБН В.2.4-1-99 (додаток Т).

Для розглянутого прикладу, для кукурудзи на силос для умов північного Степу при  $p=75\%$  зрошувальна норма складе  $2200 \text{ м}^3/\text{га}$ .

Необхідну річну зрошувальну норму стічних вод ( $M_c$ ) визначають за величиною вносу поживних елементів (N, P, K), прогнозним врожаєм сільськогосподарських культур

$$M_c = \frac{B \cdot \beta \cdot k_{em}}{10k_1Z}, \quad (12.19)$$

де  $B$  – внос поживних речовин з ґрунту прогнозним врожаєм (приймають за дослідними даними зональних і обласних сільськогосподарських станцій), кг/га.

$\beta$  – коефіцієнт забезпеченості ґрунту поживними речовинами,  $\beta=1,2, 1,0$  і  $0,8$  відповідно при категорії забезпеченості: низькій, середній і підвищеній;

$k_{em}$  – коефіцієнт втрат поживних речовин при збереженні і внесенні стічних вод;

$k_1$  – коефіцієнт використання поживних речовин рослинами зі стоків (для азоту  $k_1=0,7$ , для фосфору і калію  $k_1=0,6$ );

$Z$  – вміст поживних речовин у стоках, %.

Внос поживних речовин з ґрунту можна визначити із укрупнених норм залежно від виду продукції і врожайності сільськогосподарських культур за табл.12.10.

При прогнозному врожаї кукурудзи на силос  $600 \text{ ц/га}$  або  $60 \text{ т/га}$  зеленої маси із ґрунту виноситься ( $B$ )  $N - 60,0 \cdot 5,1 = 306$ ,  $P - 60,0 \cdot 1,5 = 90$ ,  $K - 60,0 \cdot 6,0 = 360 \text{ кг/га}$  (див. табл. 12.10).

Коефіцієнт втрат поживних речовин при збереженні визначають за формулою

$$k_{em} = 1 + k_{зб} + k_{ен} \quad (12.20)$$

де  $k_{зб}$  – втрати поживних речовин при збереженні (для азоту загального –  $0,15-0,30$ , фосфору –  $0,05-0,15$ , калію –  $0,05-0,10$ ). Більші значення приймають для південних, менші – для північних районів України. Якщо вміст поживних речовин визначається у стоках із ставка-накопичувача, то  $k_{зб}=0$ ;

$k_{ен}$  – втрати поживних речовин при внесенні стоків (для азоту при дощуванні –  $0,15$ , при поверхневому поливі –  $0,06$ , фосфор і калій втрат не мають).

**Таблиця 12.10 – Вміст поживних речовин сільськогосподарськими культурами, кг**

Сільськогосподарська культура	Основна культура	На 1 т основної і побічної продукції витрачається		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Пшениця озима	Зерно	30	12	28
Овес	Зерно	30	13	26
Ячмінь ярий	Зерно	30	13	26
Кукурудза	Зерно	23	10	21
Просо, гречка	Зерно	33	10	34
Горох	Зерно	66	16	20
Сорго	Зерно	29	14	34
Соняшник	Насіння	55	20	80
Буряк цукровий	Коренеплоди	5,5	1,6	6,0
Буряк кормовий	Коренеплоди	4,0	1,2	5,0
Картопля	Бульба	6,0	2,0	10
Зернобобові культури	Сіно	19	5,0	21
Люцерна, еспарцет	Сіно	17	5,0	15
Однорічні трави	Сіно	20	10	30
Кукурудза молочно-воскової стиглості	Силосна маса	5,1	1,5	6,0
Багаторічні трави (бобові)	Зелена маса	6,2	1,8	4,0
Однорічні трави	Зелена маса	3,9	1,3	4,5
Овочі в цілому	Плоди	4,0	2,0	5,0

Чистими тваринницькими екскрементами поливати не рекомендується, бо в них знаходиться великий вміст поживних речовин і це може призвести до перенасичення ґрунту, крім того в тваринницьких екскрементах спостерігається велика кількість нерозчинених частинок. Тому необхідно тваринницькі стоки підготувати, тобто розбавити чистою водою. Тоді вміст поживних речовин в приготованих тваринницьких стоках буде

$$Z = \frac{P_i}{K}, \quad (12.21)$$

де  $P_i$  – вміст поживних речовин в екскрементах тварин (див. табл. 12.9), %;

$K$  – кратність розбавлення тваринницьких екскрементів. Для даного прикладу  $K = 20$ , тобто на 1 м<sup>3</sup> екскрементів потрібно 20 м<sup>3</sup> чистої води.

Річна зрошувальна норма стічних вод для розглянутого прикладу складає

$$\text{ - для азоту } k_{\text{зо}}=0,20, k_{\text{вн}}=0,15, k_{\text{вм}}=1+0,20+0,15=1,35, Z = \frac{0,51}{20} = 0,0255\%,$$

$$M_N = \frac{306 \cdot 1,2 \cdot 1,35}{10 \cdot 0,7 \cdot 0,0255} = 2777 \text{ м}^3/\text{га};$$

- для фосфору  $k_{зб} = 0,05$ ,  $k_{вт} = 0$ ,  $k_{зм} = 1 + 0,05 = 1,05$ ,  $Z = \frac{0,22}{20} = 0,011$  %,

$$M_P = \frac{90 \cdot 1,2 \cdot 1,05}{10 \cdot 0,6 \cdot 0,011} = 1719 \text{ м}^3/\text{га};$$

- для калію  $k_{зб} = 0,05$ ,  $k_{вт} = 0$ ,  $k_{зм} = 1 + 0,05 = 1,05$ ,  $Z = \frac{0,46}{10} = 0,023$  %,

$$M_K = \frac{360 \cdot 1,2 \cdot 1,05}{10 \cdot 0,6 \cdot 0,023} = 3287 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Величина зрошувальної норми для кукурудзи на силос, що розрахована за дефіцитом водоспоживання складає  $M = 2200 \text{ м}^3/\text{га}$  (див. додаток Т). З аналізу отриманих зрошувальних норм за окремими поживними речовинами бачимо, що  $M_P < M$ . Це означає, що компенсація вивнесеного урожаю кукурудзи фосфору проходить повністю і навіть буде накопичення цього елемента в ґрунті. Тоді як за азотом і калієм повної компенсації не спостерігається, оскільки  $M_N$  і  $M_K > M$ .

При поливах тваринницькими стоками збільшення внесення поживних речовин також небажане, так як можливе надмірне накопичення цих речовин у врожаю і погіршитися його якість, тому для даного випадку розрахункова зрошувальна норма повинна складатись з тваринницьких стоків і чистої води відповідно 1719 і 481  $\text{м}^3/\text{га}$ . Округливши до нормативних значень маємо – 1720  $\text{м}^3/\text{га}$  тваринницьких стоків і 480  $\text{м}^3/\text{га}$  чистої води.

**3. Потрібну площу землеробських полів зрошення** розраховують виходячи із об'єму стічних вод. Загальний об'єм стічних вод можна розрахувати за формулою

$$W_p = \frac{M_c \cdot N_e \cdot K \cdot 365}{\gamma}, \quad (12.22)$$

де  $M_c$  – добовий вихід екскрементів від однієї тварини, кг/добу;

$N_e$  – поголів'я тварин, голів;

$\gamma$  – щільність стічних вод ( $\gamma = 1010 \text{ кг/м}^3$ );

$K$  – кратність розбавлення стічних вод.

$$\text{Для розглянутого випадку } W_p = \frac{5 \cdot 2000 \cdot 20 \cdot 365}{1010} = 72,3 \text{ тис. м}^3.$$

Площу, яку необхідно забезпечити для повного використання стоків для зрошення визначають за формулою

$$F_{зпз} = \frac{W_p}{M_{сер.зв}}, \quad (12.23)$$

де  $M_{сер.зв}$  – середньовиважена зрошувальна норма,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

Якщо розрахунки виконувати для кукурудзи на силос то

$$F_{зпз} = \frac{72300}{1720} = 42,0 \text{ га}.$$

## 12.5. Режим зрошення сільськогосподарських культур в теплицях

Поливну норму для сільськогосподарських культур можна розрахувати за формулою

$$m = \frac{\gamma(\beta_{HB} - \beta_{min})}{100}, \text{ л/м}^2, \quad (12.24)$$

де  $m$  – поливна норма, л/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – маса шару ґрунту, кг/м<sup>2</sup>;

$\beta_{HB}$  та  $\beta_{min}$  – вологість ґрунту, що відповідає НВ та межі зволоження перед поливом.

Оптимальна вологість ґрунту повинна бути до початку плодоношення 65–70 % НВ, а в період плодоношення – 75–90 % НВ.

Поливна норма залежить від періоду вегетації та особливостей культури. При вирощуванні розсади вона складає 3–4 л/м<sup>2</sup>, в період появи сходів білокачанної капусти, наприклад, – до 10 л/м<sup>2</sup>, а період вирощування помідор – до 20 л/м<sup>2</sup>. При вирощування огірка поливна норма коливається від 2–3 в січні до 5–6 л/м<sup>2</sup> в червні, для помідора – від 5–8 в лютому до 10–12 л/м<sup>2</sup>.

В ясну погоду, коли транспірація рослин вище, ніж у похмуру і поверхня ґрунту більше випаровує вологи, поливи проводять частіше. Так, в січні огірок поливають 10–12 разів, а в червні, серпні 27–30. Під час плодоношення огірок необхідно поливати після полудня, щоб краще зволожити ґрунт і зміцнити ріст плодів вночі.

Теплиця закрита від зовнішнього впливу погодних умов (атмосферних опадів, температури і вологості повітря), тому необхідно повністю створювати мікроклімат найбільш сприятливий для рослин. Можна вважати, що поливи повинні задовольняти потребу рослини у воді повністю, тобто  $M=E$  (зрошувальна норма відповідає сумарному водоспоживанню).

### *Питання для самоконтролю*

1. Які способи поливу застосовують для зрошення рису?
2. Чому зрошувальна норма рису в декілька разів більша за норму інших культур?
3. З яких елементів складається водний баланс рисового чеку?
4. Яким чином розраховують гідромодуль рису подачі і дренажно-скидного стоку?
5. Яка особливість побудови і укомплектування графіку поливу рису?



6. *Яка особливість режиму зрошення культур, які поливають краплинним способом?*
7. *Що таке частка площі живлення рослин? Як її розраховують?*
8. *Від чого залежить площа живлення однієї крапельниці?*
9. *Яка особливість розрахунку поливної норми при краплинному зрошенні?*
10. *Яка особливість режиму зрошення зрошуваних культурних пасовиць?*
11. *Як встановлюють строки поливу для культурних зрошуваних пасовиць?*
12. *Які особливості поливного режиму на зрошуваних землеробських полях?*
13. *Від чого залежить річна зрошувальна норма на землеробських полях зрошення?*
14. *Як розраховують поливну норму для сільськогосподарських культур в теплицях?*
15. *Яка оптимальна вологість ґрунту повинна бути для культур в теплицях?*
16. *Від чого залежить сумарне водоспоживання сільськогосподарських культур в теплицях.*

## **13. АВТОМАТИЗАЦІЯ І ОПЕРАТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ ПОЛИВІВ**

Транспортування води каналами або водогонами, розподіл її між господарствами і ділянками для економного використання, потребує високої точності і злагожденості роботи всіх ланок. Цього можна досягти в автоматичному режимі, який широко впроваджується у виробництві.

Як відзначалось в розділі 2 режими зрошення поділяють на проектні і експлуатаційні. В раніше викладених розділах розглядали методи розрахунку саме проектних і експлуатаційних сезонних режимів зрошення під певну забезпеченість, або конкретні роки в ретроспективному розрізі. Реалізувати їх у конкретному поточному році неможливо, оскільки невідомо, які фактично погодні умови будуть, тому необхідно розробляти такий режим зрошення, який постійно потрібно корегувати відповідно до погодних умов поточного року.

### **13.1. Організація встановлення поливного режиму сільськогосподарських культур**

Для економії води і поліпшення режиму зрошення сільськогосподарських культур створюють автоматизовані системи управління поливами. Такі системи управління поливами створюються і в Україні, які називають автоматизовані інформаційно-дорадчі системи оперативного планування зрошення (АІДС ОПЗ). Першим розробником цієї системи в свій час був Науково-дослідний інститут гідротехніки і меліорації (нині Інститут водних проблем і меліорації НААНУ). В основу її покладено математичне моделювання функціональної залежності сумарної витрати води полем (сумарного випаровування) від метеорологічних умов.

Оптимальне управління системою зрошення потребує відбору та обробки великих об'ємів різної інформації, що можливо тільки при використанні математичних моделей, які описують процеси, що відбуваються на полі.

АІДС ОПЗ вирішують такі завдання:

- прогнозування строків та норм поливів для кожного поля окремо і динаміки зміни запасів вологи в ґрунті;
- складання оперативних планів поливів для сукупності полів сівозміни;

- оперативне (за дефіциту ресурсів води) корегування планів водокористування для отримання максимального ефекту від використання наявних ресурсів на сукупності полів сівозміни;
- підготовка інформаційних звітів для керівних органів про хід поливів.

Запаси вологи в ґрунті вимірюють один раз за рік ранньою весною. В наступні періоди вологозапаси в ґрунті розраховують за моделями їх динаміки. Для контролю правильності розрахунків необхідно виділити 4-5 контрольних полів, на яких поливи здійснюють в точній відповідності з рекомендаціями АІДС ОПЗ і ведуть систематичні вимірювання вологості. Результати вимірювань порівнюють за розрахованою системою. При виявленні систематичних розбіжностей вологозапаси корегують. Епізодичні контрольні вимірювання вологості здійснюють при виникненні сумнівів в правильності розрахунків.

Основою першого розрахункового комплексу АІДС ОПЗ була багатопшарова модель добової динаміки зміни запасів вологи в десяти 15-сантиметрових шарах ґрунтового профілю. Хід зміни запасів вологи в кожному шарі визначали за рівнянням водного балансу. При цьому поряд з низхідним пересуванням поливної води та атмосферних опадів модель враховувала пошарові витрати вологи на фізичне випаровування та дедукцію корінням рослин.

Потенційне (сумарне) випаровування, реалізувалось при вологості ґрунту вище критичного рівня, його розраховували удосконаленим біокліматичним методом В.П. Остапчика, і приймали пропорційним до водної поверхні, що вимірювались з допомогою випаровувача ГГИ-3000.

У зв'язку із малою кількістю пунктів установки випаровувачів ГГИ-3000, випаровування розпочали визначати пропорційно випаровуваності, розрахованої за формулою М.М. Іванова, що включає середньодобові виміряні температуру і відносну вологість повітря. Ця випаровуваність характеризує погодні умови, що впливають на сумарне випаровування.

Сумарне випаровування визначають множенням пропорційного випаровування на емпіричні коефіцієнти водоспоживання культур, значення яких змінюються протягом вегетаційного періоду культур від 0,5–0,6 в початковій та кінцевій фази розвитку до 1,0–1,2 в фазі найбільш активної вегетації. При зниженні вологості нижче критичного рівня потенційне випаровування множать на коефіцієнт редуції, значення якого зменшуються від 1,0 при вологості, що відповідає

критичному рівню або перевищує його, до 0 при вологості в'янення. За даними розробників похибка розрахунків складає 5–10 %.

В сучасних умовах для розрахунку сумарного водоспоживання в основному застосовують метод ФАО, який має найбільше теоретичне обґрунтування і найбільше застосування в світі (для різних кліматичних зон світу).

Динаміку зміни запасів вологи розраховують на кожну добу. Розрахунки планів поливів виконують регулярно один раз в тиждень на десять діб вперед.

В основу прогнозування динаміки вологості на наступні 10 діб лежить припущення, що атмосферних опадів не буде, а добова температура та вологість повітря будуть відповідати середньо багаторічним значенням. Це орієнтує господарство на гірший варіант, в разі випадіння великих атмосферних опадів (більше 5 мм) перенести полив на більш пізні строки нескладно.

Ці припущення не призводять до накопичення похибок, так як кожен тиждень прогнозні дані (за метеорологічними умовами) в розрахункові дні рекомендацій корегуються фактичними.

### **13.2. Основні завдання організації оперативного поливного режиму сільськогосподарських культур**

Для оперативного планування необхідна така інформація:

- *наукова нормативно-довідкова* до моделі, що постійно зберігається в пам'яті електронного носія, про глибину активного шару ґрунту, верхню та нижню межу оптимального зволоження, критичний рівень запасів вологи за типом ґрунту, біологічні коефіцієнти водоспоживання та ступінь покриття рослинами поля, які змінюється за фазами;
- *умовно-постійна* (сезонна), що вводиться до електронного носія на початку поливного сезону (як правило, не змінюється протягом зрошуваного періоду), про вирощувані культури, тип ґрунту, запаси вологи в 15-сантиметрових шарах при НВ і вологості в'янення, середньо багаторічні значення добових температур і відносної вологості повітря, параметри робочих характеристик закріплених дощувальних машин;
- *оперативна*, що вводиться до електронного носія один раз на тиждень для виконання чергових розрахунків, про погодні

умови, що були на минулому тижні (атмосферні опади, температуру та відносну вологість повітря), зміну фаз розвитку культур на полях, фактичних (виправлених) строках і нормах поливів.

При встановленні експлуатаційного поливного режиму сільськогосподарських культур необхідно визначити такі основні завдання, які можна розділити на 5 груп.

***Планування експлуатаційних режимів зрошення на наступний сезон:***

- збирання нормативно-довідкової інформації за сільськогосподарськими культурами (необхідні суми активних температур повітря для настання тієї чи іншої фенологічної фази розвитку, розподіл біокліматичних коефіцієнтів водоспоживання, глибина розповсюдження кореневої системи, чутливість до поливу, ступінь затінення поверхні поля та ін.). Як правило, ця інформація стандартна і зібрана розробниками інформаційної системи. Користувач може її дещо змінювати залежно від якихось специфічних умов (нові сорти, новий вид вирощуваної продукції та ін.);
- збирання і аналіз відомостей про технічний стан поливної техніки, зрошувальної мережі, структури і розташування посівів, інших організаційно-господарських умов, що склались на наступний поливний сезон;
- розробка планових експлуатаційних режимів зрошення (як правило, на посушливий рік 75 %-ї забезпеченості) і графіків поливу сільськогосподарських культур на наступний сезон. Ця інформація в майбутньому поливному сезоні буде весь час уточнюватись і змінюватись.

***Контроль меліоративного стану зрошуваних земель:***

- збирання і уточнення даних про водно-фізичні властивості ґрунту і динаміку екологічного стану зрошуваних земель (щільність ґрунту, вологість при найменшій вологоємкості, засоленість і солонцюватість ґрунту, глибину залягання і мінералізацію ґрунтових вод та ін.);
- визначення вихідних (на початку вегетації) і контрольних (декілька протягом вегетації) вологозапасів в ґрунті.

***Оперативне планування і корегування графіків поливу:***

- збирання і аналіз поточної і прогнозованої метеорологічної інформації;

- уточнення відомостей про фази розвитку сільськогосподарських культур;
- уточнення відомостей про поточний стан зрошувальної мережі, поливної техніки і реалізовані поливи;
- планування строків і норм поливу на наступні 10 діб і щоденне їх корегування на підставі поточної ситуації;
- прийняття рішення про необхідність поливу і підготовку оперативного плану поливів.

***Оперативне управління поливами:***

- видача завдання машиністу на полив на наступну добу;
- контроль і аналіз виконання оперативного плану і якості поливу за попередню добу;
- оперативні консультації технічного і адміністративного персоналу.

***Облік і звітність про хід поливу:***

- підготовка інформації про реалізовані поливи по сільськогосподарських культурах, сівозміні, бригаді, експлуатаційній ділянці за попередню добу, тиждень, декаду, місяць, зрошуваний період.

### **13.3. Черговість проведення поливів**

Оптимізація режимів зрошення в умовах дефіциту водних та енергетичних ресурсів зводиться до встановлення чергування проведення поливів на окремих полях. У відповідності до пріоритетів, що визначають в балах залежно від народногосподарського значення культури, їх видової посухостійкості та чутливості до недостатнього водопостачання в конкретну фазу розвитку, а також від рівня пониження вологості ґрунту і стану культури. Бальна оцінка пріоритету даної поливної ділянки під  $k$ -ю культурою в  $i$ -й декаді, на яку планується полив, визначають за формулою

$$B_{f,i} = X_{f,i}^{(k)} + Y_f^{(k)} + N_f^{(k)} + \Phi_{f,i} + k_w \cdot \Delta W_{f,\tau}, \quad (12.1)$$

де  $f$  – номер поливної ділянки;

$k$  – номер сільськогосподарської культури;

$i$  – номер декади, на яку планують поливи;

$X_{f,i}^{(k)}$  – належність культури до тієї чи іншої пріоритетної групи залежно від господарської цінності її продукції або від ступеня ризику втрати її врожайності (культури в екстремальних умо-

вах  $X_{f,i}^{(k)}=13$ ; культури, що вирощують тільки при зрошенні – 11; культури що мають високе народногосподарське значення – 6; культури, що мають місцеве господарське значення – 1,5; культури малоперспективні – 1);

$Y_f^{(k)}$  – підгрупа агрономічної посухостійкості, до якої відноситься культура (пшениця озима, кукурудза – 3, соняшник – 2, просо – 1, перець – 4; капуста – 5);

$N_f^{(k)}$  – ранг (номер) культури в ранжируемому ряду за порівняльним ступенем посухостійкості (визначається як номер в ранжируемому ряду помножений на 0,01);

$\Phi_{f,i}$  – підгрупа чуйності до пониження вологості ґрунту нижче критичного рівня, до якої відноситься культура в дану фазу розвитку (пшениця озима: відновлення вегетації – 1, кущіння – 2, трубкування – 3, колосіння – 4, квітання – 4, наливання зерна – 3, молочна стиглість – 2, воскова стиглість – 0);

$k_w$  – множник для врахування  $\Delta W_{f,i}$ ;

$\Delta W_{f,i}$  – ступінь зниження запасів вологи в активному шарі ґрунту нижче критичного рівня  $W^{(кр)}$

$$\Delta W_{f,i} = \frac{W^{(кр)} - W_{f,i}}{W^{(HB)} - W^{(BB)}} \cdot 100 \text{ при } W_{f,i} < W^{(кр)} \quad (12.2)$$

де  $W_{f,i}$  – поточні запаси вологи в активному (кореневмісному) шарі ґрунту;

$W^{(HB)}$  та  $W^{(BB)}$  – запаси вологи відповідно при НВ та вологості в'янення.

Найбільшу кількість балів надають культурам, що опинились в критичній ситуації (наприклад, пшениця в фазу наливання зерна), а також овочі, вирощування яких без поливу неможливе (розсада).

### 13.4. Недоліки та проблеми впровадження інформаційно-дорадчих систем

Впровадження та експлуатація інформаційно-дорадчої системи в практичній діяльності зрошення дає позитивні результати у всіх регіонах застосування зрошення.

Успіх управління поливами у всіх випадках можна досягти при якісній реалізації трьох функцій:

- планування технологічного процесу поливу;
- направленою регулювання цього процесу (в даному випадку виконання оперативного плану поливів);
- реалізація технічного контролю.

Впровадження інформаційно-дорадчих систем в зв'язку з широким насиченням персональними комп'ютерами дає можливість на місці вирішувати всі питання з планування і корегування режимів зрошення в межах однієї або декількох сівозмін.

Однією із причин, що обмежує впровадження інформаційно-дорадчих систем є *недостатня забезпеченість землеробства базисною інформацією про ґрунтово-екологічні умови на полях сівозміни*. Відсутні також розроблені для основних типів ґрунтово-екологічних умов рекомендації на обмеження.

Функції технологічного контролю на зрошуваних землях складаються в збиранні та передачі інформаційно-дорадчій системі даних інформації, зворотному зв'язку про фактичні строки та норми поливів, про досягнутий ефект регулювання динаміки запасів вологи в ґрунті на полях, а також про кінцевий ефект, що досягається в результаті цього регулювання. Від точності цих даних залежить правильність всього наступного управління. *Але засоби експлуатаційної гідрометрії на внутрішньогосподарській мережі та дощувальних машинах, за окремими випадками, відсутні*. В кращому випадку вимірюють витрати подачі води на водовиділах в господарства, а іноді на сівозміні, наприклад, насосних станціях (НСП). Що ж стосується фактичних поливних норм на окремих полях, то вони визначаються приблизно. При поливах дощуванням об'єм вилитої води визначають, як правило, за витратами, із паспортних характеристик машин, і зареєстрованої (з тим чи іншим наближенням), не завжди точно, тривалості роботи її на даному полі. При цьому неминучі непередбачені похибки, але можливі і зловживання – показ завищених поливних норм або навіть поливів, яких не було.

Також не все гаразд з *технічними засобами для контролю вологості ґрунту*. Виробництву для забезпечення надійного контролю за якістю зрошення необхідно мати методи, які б забезпечили суцільну зйомку вологості на полях і автоматизований аналіз результатів. Такі методи і технічні засоби, які б відповідали всім вимогам управління поливами, поки що не розроблено.



## 13.5. Методи і засоби вимірювань запасів вологи в ґрунті

Основним показником при оперативному плануванні поливів є визначення запасів вологи в ґрунті. Особливо це актуально на початку вегетації кожної сільськогосподарської культури, так як на наступні періоди можна визначити запаси вологи відштовхуючись від початкових балансовим методом. Якщо при проектуванні зрошувальних систем або розробляючи сезонні експлуатаційні режими зрошення можна скористатись запасами вологи за минулі роки, то при розрахунку оперативних режимів зрошення в поточний рік в конкретних умовах потрібно мати початкові запаси вологи поточного року.

У наш час існує багато підходів і методів визначення запасів ґрунтової вологи, які можна розділити на чотири принципово різних підходи до вимірювання вологозапасів.

1. Безпосереднє вимірювання вологості відібраного зразка.
2. Вимірювання характеристик ґрунту, які залежить від вологості ґрунту.
3. Дистанційне вимірювання запасів вологи за допомогою датчиків різної конструкції.
4. Аерокосмічні методи визначення запасів вологи.

### **Безпосереднє визначення вологості відібраного зразка**

Перший із методів визначення вологості ґрунту оснований на виїманні зразка із шару ґрунту, вологість в якому необхідно визначити, з наступним визначенням в ньому маси вологи, видаленої сушкою в термостаті. Незважаючи на те, що цей метод громіздкий і трудомісткий, його до сих пір широко застосовують, оскільки він поки є єдиним прямим методом визначення вологості ґрунту.

У більшості випадків зразки ґрунту відбирають з певною повторюваністю ґрунтовими бурами, а іноді і із свіжовикопаного шурфу. Запропоновано багато різних конструкцій бурів, які детально описані Н.А. Качинським і О.А. Роде.

Вологість ґрунту у відібраних зразках частіше за все визначають методом «гарячої сушки». Однак сушка здійснюється не ідентично: при різних температурах, на водяній бані, або в термостаті, із застосуванням ексикатора і без нього. Щоб скоротити час сушки, іноді застосовують сушку інфрачервоними променями, метод горючого спирту, метод холодної сушки (що ґрунтується на знезвожуванні ґру-

нту поглиначами  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), пікнометричний, спиртовий, карбідний барометричний і карбідний ваговий методи.

Найбільшого розповсюдження отримав термостатно-ваговий (гравіметричний або буровий) метод, який є в наш час еталонним: він детально описаний в спеціальній літературі: «Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам, 1973». Однак цей метод недостатньо придатний для практичних потреб через велику трудомісткість, особливо в ході стеження за настанням передполивного порогу на декількох зрошуваних полях одночасно.

Головними недоліками термостатно-вагового методу є такі (Литовченко А.Ф., 2011):

- 1) в зв'язку з тим, що вологість визначають в окремому зразку ґрунту, взятому з нижньої частини бурового циліндра, а не в шарі 10 см, одержані дані є випадковими і їх, здебільшого, неможливо розповсюджувати на все поле;
- 2) тривалість процесу визначення вологості ґрунту становить 1,5–2,0 дні, що спричиняє запізнення для прийняття технологічних рішень, бо при значних опадах чи суховіях вологість ґрунту за цей час може істотно змінитись;
- 3) трудомісткість методу та вартість апаратури обумовлюють високу собівартість одержання необхідної інформації про вологість ґрунту.

Враховуючи вказані недоліки термостатно-вагового методу визначення вологості ґрунту вже протягом досить тривалого часу розробляють непрямі (опосередковані) методи, засновані на вимірюванні фізичних властивостей ґрунтів, які в певній мірі залежать від їх вологості.

### **Вимірювання характеристик ґрунту, які залежить від вологості ґрунту**

Інший підхід передбачає стаціонарне влаштування датчиків вимірювальних приладів, які діють за тим чи іншим принципом і дозволяють в будь-який момент часу вимірювати вологість в точках установки датчиків. Цей підхід має ряд суттєвих переваг перед першим. Важливіше з них – це можливість послідовно визначати вологість в одній і тій же точці даного шару ґрунту протягом тривалого часу і при цьому з будь-якою частотою і навіть безперервно. Перевага цього підходу також і в тому, що він дозволяє вимірювати вологість ґрунту з меншою повторністю, тобто установкою декількох паралельних

приладів на невеликому майданчику. І ще одна його перевага полягає в тому, що визначення вологості, тобто відлік по приладу і знаходження шуканої величини по тарувальній кривій, потребує порівняно невеликих затрат часу.

Для цих потреб зазвичай використовують електромагнітні, тензотричні і ядерні методи вимірювання.

**Електромагнітні методи** ґрунтовані на використанні залежності електричних властивостей ґрунту від її вологості. До них можна віднести використання двох типів приладів. Один із них вологість вимірює на підставі залежності між вологістю ґрунту і її електричним опором; а іншим – вимірюють електроємність ґрунту, яка безпосередньо пов'язана з вмістом води в ньому.

Першим типом приладів *електроопір ґрунту* вимірюється або безпосередньо між електродами, встановленими в ґрунт, або шляхом зміни електроопору пористого тіла, розташованого в ґрунт і знаходиться з ним в зволоженій рівновазі. В якості таких пористих тіл зазвичай використовують гіпсові блоки або датчики із нейлонового або скловолкна. В кожен блок або датчик вмонтована пара металевих або вугільних електродів. Таке пористе тіло всмоктує в себе деяку кількість вологи, яка відповідає реальній її вологості. В подальшому вона змінюється із зміною вологості ґрунту. При цьому між вологістю ґрунту і вологістю пористого тіла існує деяка залежність. Зміна вологості пористого тіла реєструється шляхом вимірювання його електропровідності. За величиною останньої, знаходять вологість ґрунту.

Одним із найбільш суттєвих недоліків першого методу полягає в тому, що електроопір ґрунту залежить не тільки від вологості ґрунту, але і від концентрації іонів в ґрунтового розчині. Тому навіть при ретельному вихідному градуванні приладу її необхідно періодично повторювати.

До сучасних приладів такого класу можна віднести:

- «Агротестер», в основу якого покладено метод вимірювання комплексного опору ґрунту в змінному електричному полі (так званий кондуктометричний метод).
- Вимірювач параметрів ґрунтів ВПГ-1 (ИПП-1), в якому використано принцип вимірювання комплексної електропровідності  $Y$  в змінному струмі низької частоти (до 10 кГц).

В *електроємнісних методах* ґрунт при даній вологості розглядають як гомогенний діелектрик. Зміни діелектричної постійної ґрунту буде визначатись його вологістю. Тому, об'ємну вологість можна ви-

значати за даними електроємності ґрунту. У всьому діапазоні вологості ця залежність носить нелінійний характер, що ускладнює застосування даного методу.

Представником цього методу визначення вологості ґрунту є:

- Вимірювач параметрів ґрунтів ВПГ-4ц;
- Надвисокочастотний вологомір ґрунтових зразків СВП-5.

Із **ядерних методів** визначення вологості ґрунту в наш час застосовують нейтронний і гаммаметричний методи.

*Нейтронний метод* заснований на випусканні радіоактивним джерелом в ґрунт нейтронів з високою енергією (мільйон і більше електронвольт) і середньою швидкістю понад 1600 км/с, при цьому внаслідок пружних зіткнень з ядрами атомів водню нейтрони сповільнюються до теплової енергії (2,7 км/с). Середня втрата енергії при зіткненні з атомами легких елементів більше, чим при зіткненні з важкими. В результаті водень, що входить до складу ґрунтової вологи, сильніше за всі елементи сповільнює нейтрони. Кількість сповільнених нейтронів пропорційна кількості зіткнень швидких нейтронів з молекулами води, що є в ґрунті. В якості джерела швидких нейтронів зазвичай використовують плутонієвоберилієву суміш. Об'єм, в якому вимірюються вологість, залежить від енергії випромінюваних нейтронів і концентрації водневих ядер, тобто для конкретних джерела і ґрунту він залежить від об'ємної концентрації ґрунтової вологи. В сухому ґрунті хмара повільних нейтронів навколо зонда, буде менш щільним і розповсюджуватись далі від джерела, а у вологому ґрунті – навпаки.

Застосовуючи нейтронний метод, середню вологість вимірюють в об'ємі, що перевищує в тисячі разів об'єм зразків ґрунту, який зазвичай відбирають для визначення вологості термостано-ваговим способом. Головні недоліки цього методу полягають в тому, що прилад має низький ступінь роздільної здатності, неточний при вимірюванні вологості в поверхневих шарах і небезпечний для здоров'я спостерігача, так як робота його пов'язана з нейтронною радіацією. Сповільнення нейтронів в ґрунті є наслідком наявності не тільки води, але і помітної кількості водню в мулистій фракції і особливо в органічній речовині.

Широкого застосування цей метод отримав у вигляді нейтронного вологоміра ВПП-1

*Гаммаметричний метод* заснований на тому, що пучок гаммапроменів, який випромінює таке джерело, як  $^{137}\text{Cs}$ , послаблюється,

проходячи через ґрунт, і ступінь його послаблення зростає зі зволоженням ґрунту. Метод має ряд переваг перед нейтронним, так як має більшу глибину роздільної здатності і можливість визначення вологості у верхніх шарах ґрунту. Нажаль, в сучасних умовах приладів для визначення вологості ґрунту для широкого вжитку не існує.

Визначення вологості ґрунту шляхом встановлення в ґрунті стаціонарних датчиків спеціальних приладів також можна проводити *тензіометричним способом*. Однак безпосереднім призначенням тензіометрів є визначення енергетичного стану води в ґрунті. Проте, залежність між енергетичним станом води і її вмістом в ґрунті дозволяє використовувати тензіометри для визначення вологості. Цей метод визначення вологості ґрунту, на думку багатьох вчених, є найбільш перспективним, так як за значенням тиску ґрунтової вологи можна оцінити її доступність для рослин.

Тензіометричний метод у зрошенні використовують переважно за дощування і крапельного поливу, завдяки чому є змога правильно призначати строки, норми поливу й удобрення, тим самим створювати найкращі умови для отримання високої врожайності і якості продукції рослинництва.

Відомо, що всі фактори, які впливають на рослину (вітер, випаровування, фотосинтез, сонячне випромінювання, температура повітря тощо), конвертуються в активність кореневої системи, а саме в інтенсивність всмоктування нею вологи з ґрунту. Стан і закономірності переміщення ґрунтової вологи, її доступність для рослин обумовлені зв'язком вологи з ґрунтом.

Енергію зв'язку в зоні оптимального для розвитку рослин вологовмісту кількісно можна визначити через капілярний потенціал. Еквівалентом потенціалу ґрунтової вологи є тиск – сила, яку корені рослин застосовують, щоб вилучити воду з ґрунту для живлення. Цей тиск вимірюється в польових умовах тензіометрами – вологомірами ґрунту. Тензіометри застосовують для контролю вологозапасів на зрошуваних землях із різним ґрунтовим покривом: від субстрату, піщаного і супіщаного, до важкосуглинкового, незалежно від глибини залягання ґрунтових вод, способу і техніки поливу, а також виду агрокультур.

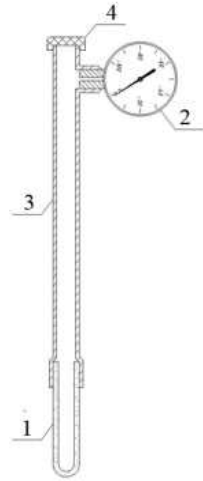
Найбільш відомі світові виробники тензіометрів – це компанії Irrrometer Company Inc., Soil Moisture Equipment Corp., Meter Group Inc. (США); Mottes Tensiometers, AMI Tens Ltd, Tevatronic Ltd (Ізра-

іль); Mosler Tech Support (Німеччина). Україна також має власного виробника тензіометрів – компанію Aquates («Акватек»).

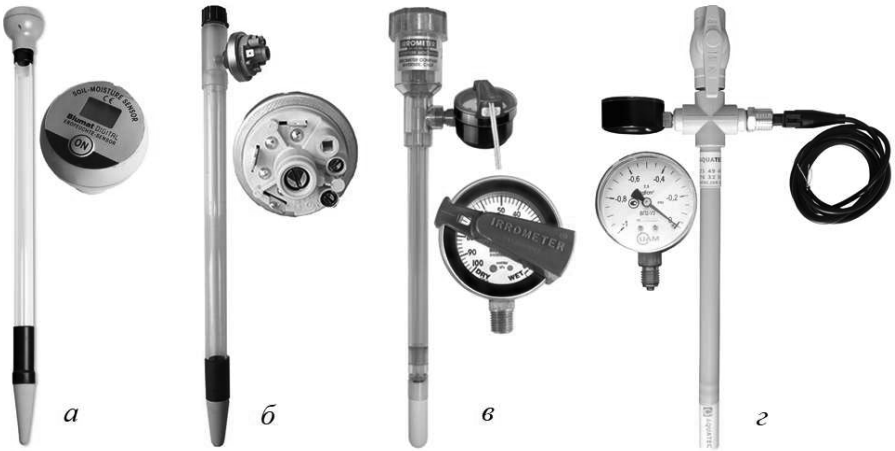
Механічний тензіометр зазвичай складається із мікропористого керамічного зонду, вимірювального пристрою – вакуумметра, водної камери із кришкою (рис. 13.1). Вузли з'єднують між собою герметично, прилад заповнюють чистою водою.

Сучасні тензіометри можуть комплектуватися електроконтактними вакуумметрами або електронними вимірювачами тиску (рис. 13.2).

Практично кожен виробник модернізував основну будову тензіометра. Так, компанії Irrrometer Company Inc. та Soil Moisture Equipment Corp. оснастили прилад резервуаром, який містить додатковий об'єм води, що використовується під час дозаправлення тензіометра за умови тривалих високих значень усмоктувального тиску ґрунту, остання встановила на резервуарі кришку із кнопкою Jet Fill (рис. 13.3, а).



**Рисунок 13.1 – Механічний тензіометр-воломір ґрунту:** 1 – мікропористий керамічний зонд, 2 – вакуумметр, 3 – водна камера, 4 – кришка



**Рисунок 13.2 – Тензіометри з електроконтактними вакуумметрами (а-в) та електронним вимірювачем тиску (г).**



**Рисунок 13.3** Тензіометр компанії *Soil Moisture Equipment Corp.* і резервуар *Jet Fill* (а), тензіометр *AMI Tens Ltd* із кришкою-вакуумметром (б), тензіометр компанії *Aquatec* із кульовим краном (в)

Ці виробники також пропонують застосовувати ручний вакуумний насос для швидкого видалення повітря із приладу. Компанії *AMI Tens Ltd* і *Mosler Tech Support* закривають герметично водну камеру тензіометра кришкою-вакуумметром (рис. 13.3, б). Тензіометр *Aquatec* оснащений відводом із кульовим краном для зручного дозування (рис. 13.3, в).

Майже всі виробники виготовляють екстрактори – відбірники проб ґрунтового розчину на основі мікропористих керамічних зондів, що характеризуються проникністю ґрунтової води з розчиненими речовинами (рис. 13.4). Екстрактори призначені для вилучення ґрунтового розчину безпосередньо з кореневої зони рослин в польових умовах з метою проведення його експрес-аналізування. Це дає можливість визначити показники рН, ЕС, концентрацію солей, виявити токсичні для рослин речовини тощо, розробити схеми агротехнологічних і меліоративних заходів, які направлені на ефективне виробництво агрокультур, покращення ґрунту та його раціональне використання.

Вартість закордонних механічних тензіометрів із доставкою в Україну становить від 50 до 150 \$ за одиницю, екстракторів ґрунтового розчину – від 40 \$ і більше залежно від довжини приладів. Українські тензіометри і екстрактори коштують 30 і 15 \$ відповідно, причо-

му будь-якої довжини (від 15 см до 1 м), що набагато дешевше закордонних приладів, водночас вони не поступаються надійністю і динамічністю. До того ж українські спеціалісти консультують агровиробників щодо типу обладнання і його кількості, допомагають визначити найкращі місця встановлення, налаштовують, проводять навчання персоналу з експлуатації обладнання безпосередньо на зрошуваній ділянці, забезпечують гарантійне та сервісне обслуговування.



*Рисунок 13.4 – Екстрактори ґрунтового розчину різних виробників*

Механічні тензіометри конструктивно прості, використовуються в сільському господарстві, ландшафтному і міському зрошенні. Вони забезпечують точність і достовірність під час управління режимом зрошення, отже, дають можливість формувати водоспоживання агрокультур на рівні потенційно можливого. Проте механічні тензіометри не характеризуються високою оперативністю для визначення термінів поливу, особливо, коли міжполивний період становить 1–2 дні. У таких приладах відсутня можливість автоматизованого управління зрошенням, внаслідок чого підвищуються витрати праці.

### **Дистанційний та автоматизований експрес-контроль агрометеорологічних умов вирощування сільськогосподарських культур**

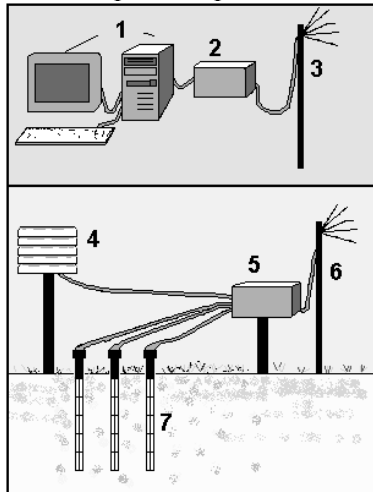
На гідрометеорологічних станціях, в науково-дослідних установах сільськогосподарського профілю, природоохоронних закладах та багатьох сільськогосподарських підприємствах ведеться важка рутинна робота, спрямована на збирання, обробку, збереження і передачу інформації про навколишнє середовище, стан рослин і т. п. Такі роботи вимагають матеріальних витрат і значної ручної праці, що призводить до суттєвого збільшення вартості інформації. Широка автоматизація цих робіт із застосуванням сучасних комп'ютерних тех-



нологій дозволила б не тільки зменшити обсяги ручних робіт, але й знизити вартість інформації і, що особливо важливо, істотно покращити її якість та оперативність. Розробка та застосування автоматизованих вимірювальних систем для збирання, обробки, передачі і збереження інформації про стан ґрунту, пов'язані з вирішенням кількох важливих проблем, серед них одна з найважливіших – проблема датчика вологості ґрунту.

На рис. 13.5 представлена модель такого вирішення задач, пов'язаних з визначенням параметрів ґрунту, її фіксації і збереження за тривалий період.

Для вимірювання такого, можливо, найголовнішого параметра, як вологість ґрунту фактично ні в Україні, ні за її межами поки що немає офіційно визнаного датчика. Але без вирішення проблеми датчика вологості ґрунту вся справа автоматизації вимірювання інших параметрів ґрунту в агрометеорології та агрономії є малоефективною. При наявності датчиків вологості ґрунту вже стають важливими також датчики температури, щільності, кислотності та інших параметрів ґрунту, рослин і повітря. Широкої автоматизації вимірювань агрометеорологічних параметрів ґрунтів може передувати створення та впровадження дистанційних агрометеорологічних постів.



**Рисунок 13.5 – Автоматизований агрометеорологічний пост (ААП):**  
1 – ПК, 2 – радіоприймач, 3 – приймальна антена, 4 – блок датчиків вологості і температури повітря, 5 – аналогово-цифровий перетворювач разом з радіопередавачем, 6 – передавальна антена, 7 – датчики вологості ґрунту

Ці пости дозволили б добре випробувати датчики та вимірювальні системи, відпрацювати технологію вимірювань і, на початку, значно зменшити трудомісткість і вартість первинної інформації про стан ґрунтів. Потім, при додаткових матеріальних затратах, ці пости легко перевести на повний автоматичний режим без зміни інфраструктури мережі агрометеорологічних спостережень.

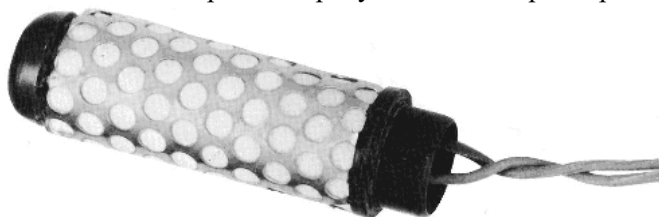
Серед таких приладів застосовують дистанційні метеорологічні пости фінської фірми «Вайсала», автоматизована метеостанція білоруського НПО «Агат», автоматизована метеорологічна станція спільного ізраїльсько-американського виробництва та вітчизняна розробка АРМ, створена Кримським НПО «Селта». Слід зазначити, що жодна із розглянутих систем не повністю відповідає завданням агрометеорології, оскільки не пропонує реального датчика для вимірювання вологості ґрунту, без якого автоматизація вимірювань є малоперспективною.

Правда, працівники НПО «Селта», включили в комплект своєї системи проект вимірювача вологості ґрунту з застосуванням перспективного (на думку переважної більшості дослідників) методу інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії.

### **Датчик вологості ґрунту корпорації Sutron (США)**

Датчик електричного опору, призначений для дистанційного контролю вологості ґрунту (рис. 13.6). Конструктивно виконаний таким чином, що основна стінка циліндра є напівпроникною (пропускає тільки воду, а всередині циліндра знаходяться два ізольовані електричні контакти і речовина, що всмоктує вологу з ґрунту. Коли внутрішня всмоктувальна сила датчика більша, ніж у ґрунті, він усмоктує воду, і віддає її, коли, навпаки, всмоктувальна сила ґрунту більша. Таким чином, між осмосом всередині датчика і ґрунту завжди існує динамічна рівновага. Діапазон осмотичних сил знаходиться в межах від 10 до 200 сантибар, а виміряний електричний опір – в межах від 500 до 30000 Ом. Датчик сертифіковано Міжнародною організацією зі стандартизації. Недоліками такого типу датчиків є велика інерційність і неможливість використання їх на будь-яких полях, а тільки на таких, які в даний момент не обробляються (такий же недолік і нейтронного вологоміра ВВП-1). Окрім того датчик – сорбційний (всмоктуючий), а це означає, що сорбційна здатність його з часом може змінюватись, а з нею і його градуїзовані параметри. Адже ґрунт – не інертне, а активне середовище. Активність, а подекуди і агресивний ха-

раक्टर цього середовища може призвести до того, що внутрішній наповнювач датчика почне хімічно взаємодіяти з ґрунтом, а це, в свою чергу, до змін в його електричних градуовальних параметрах.



*Рисунки 13.6 – Датчик вологості ґрунту корпорації Sutron (США)*

### **Тензіометрична система он-лайн**

Розвиток електронних інтерфейсів, радіотелеметрії та інтернет-технологій в галузі автоматизації систем зрошення надав змогу виробникам тензіометрів розробити систему віддаленого моніторингу вологості ґрунту із електронними тензіометрами – *тензіометричну систему онлайн* (рис. 13.7). Іригаторам, які керують мільйонами зрошуваних гектарів у світі, стало відомо коли і скільки води треба вилити на кожне поле, ґрунтуючись на оперативних, точних і достовірних даних щодо вологоутримувальної сили ґрунту, яка обумовлює доступність вологи для рослин. Інноваційність таких розробок полягає в тому, що фермери вже сьогодні можуть з офісу керувати системою зрошення на основі безперервної інформації. Тензіометричні системи віддаленого моніторингу вологості ґрунту стали важливою ланкою автоматизації виробничих процесів.



*Рисунок 13.7 – Система віддаленого моніторингу вологості ґрунту (а) і електронний тензіометр (б)*

Компанія *Mottes Tensiometers* пропонує тензіометричну систему онлайн із додатковими датчиками температури ґрунту й повітря (рис. 13.8). Компанія *Irrrometer Company Inc.* додає до тензіометричної системи датчики *Watermark*, на які не впливають низькі температури. Вони зондують електричний опір ґрунту, що корелює з ґрунтовим тиском.



**Рисунок 13.8 – Тензіометрична система онлайн компанії *Mottes Tensiometers***

Усі виробники пропонують, як правило, два режими управління системою зрошення:

**Перший** – *Tensiometers Array*, коли на ділянці зрошення встановлюють механічні тензіометри або тензіометричну систему віддаленого моніторингу вологості ґрунту. Остання передає показання вологості ґрунту мобільним зв'язком на інтернет-сервер, що прискорює прийняття рішення, коли і скільки води треба вилити на поле.

**Другий режим** – *Automatic with Decision Support*, який також передбачає встановлення на ділянці поливу тензіометрів. Управління зрошенням відбувається шляхом автоматичного повідомлення іригаторам про досягнення заданих рівнів передполивної вологості ґрунту або ж в автоматичному режимі через виконавчі контролери з встановленням часу поливу.

Ізраїльська компанія *Tevatron Ltd* у партнерстві з українською компанією «Акватек» пропонують унікальний режим управління сис-

темою зрошення агрокультур — *Autonomous Tensiometer Mode*. У цьому режимі тензометрична система онлайн автономно приймає рішення, коли і скільки поливати, на підставі введення іригатором на початку поливного сезону глибини поливу залежно від виду агрокультури, її віку та схеми садіння, порогу тензометричного тиску перед поливами (рис. 13.9).



**Рисунок 13.9 – Автономна тензометрична станція онлайн (а) і безпроводний тензіометр (б) компанії Tevatronic Ltd**

Як правило, тензіометри використовують групами по 2–3 прилади в одній станції – точці контролю вологості ґрунту. Їхня кількість і глибина встановлення в кожній точці залежать від потужності кореневмісного шару, де впроваджується контролювання вологовмісту, та способу поливу. Тензометричні станції встановлюють у репрезентативних місцях поля або окремої ділянки зрошення. Місця встановлення обирають, виходячи з однорідності ґрунтового покриву і заданої точності отримання інформації щодо вологості ґрунту. Зазвичай *перший* прилад треба встановити на глибину, що дорівнює 1/4 потужності кореневої системи рослин, а *другий* – на глибину 3/4 цієї потужності. Інший варіант: керуватися принципом розміщення одного тензіометра на кожні 20 см кореневмісного шару ґрунту. За малопотужної кореневої системи (до 0,2–0,3 м) достатньо встановити один тензіометр на глибині 15–20 см від поверхні ґрунту. За крапельного зрошення тензометричні станції встановлюють у типових для ділянки умовах на відстані 15–30 см від рослини.

За показаннями приладів поливи призначають за умови зниження тензометричного тиску на будь-якій із спостережних глибин до відповідного рівня передполивної межі кожної культури. Для більшості

агрокультур рекомендований всмоктувальний тиск становить 20–35 кПа.

Поливну норму визначають за дефіцитом вологозапасів контрольного шару ґрунту. Водночас враховують різні для кожного ґрунту залежності між тензометричним тиском та його вологістю, а також спосіб поливу.

### **Аерокосмічні методи визначення запасів вологи**

Третій підхід визначення запасів вологи об'єднує методи, які отримали досить широкий розвиток в останній час через спокусу здійснювати вимірювання вологості ґрунту на відносно великій площі. Ці методи ґрунтуються на вимірюванні електромагнітної енергії, відбитої або випроміненої поверхнею ґрунту. Зміна інтенсивності електричної енергії пов'язана як із зміною діелектричних властивостей ґрунту, так і зі зміною температури ґрунту залежно від її вологості. Для дистанційного визначення вологості ґрунту використовують довгохвильове (10 м) теплове інфрачервоне випромінювання і ультракороткі радіохвилі (1–50 см) у вигляді радіолокаційного зондування.

Для степової зони України А.А. Бердник встановив залежність коефіцієнта випромінювання, отриманого відповідним методом СВЧ-радіометра, від загальних запасів ґрунтової вологи. Це дало підставу за коефіцієнтом випромінювання оцінювати з задовільною точністю вологість ґрунту за окремими шарами для глибини 30 см. Відносна похибка цих вимірювань у 85 % випадків не перевищує 10 %; для більших глибин – вона суттєво більше, і тому метод не може бути рекомендований для практичного застосування.

У США (в заповіднику Конза Прерія) вимірювання вологості в шарі ґрунту 0–5 см здійснювали за допомогою СВЧ-радіометра з безпосередніми наземними вимірюваннями, хоча при вологості ґрунту нижче 1–8 % спостерігались суттєві розходження між ними.

Отже, як показує ряд вищевикладених досліджень, радіометричний метод може застосовуватись тільки для визначення запасів вологи у верхніх шарах ґрунту: чим більш висушений ґрунт, тим в меншому шарі визначається вологість. Особливо великі похибки вимірювання вологості спостерігаються тоді, коли в ґрунті є сухі прошарки, які наче екранують випромінювані теплові і радіохвилі. Тому важко встановити, до якої товщі ґрунту відносити вологість.

В 1985 р. на території Дніпропетровської області Ю.Д. Зеленським була проведена 10-кратна зйомка зволоженості зрощуваних ма-

сивів загальною площею біля 100 тис. га. Зйомочні роботи виконували з квітня по вересень за окремими масивами площею 12–35 тис. га (Бородачик А.С. та ін, 1987). Відстань між зйомочними маршрутами складала 250 м. Середня продуктивність зйомки – 200 га/год. Для відповідної обробки результатів зйомки був створений пакет графічних програм побудови карт вологості ґрунту на ЕОМ. Пізніше цей метод не знайшов широкого практичного застосування в розглянутій області через велику вартість льотно-зйомочних робіт і низьку якість отриманих результатів.

Натомість в сучасних умовах широкого розповсюдження набувають космічні методи обстеження великої площі землі. Особливе місце в космічній діяльності займає дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). Відповідно до резолюції Генеральної Асамблеї ООН 41/65 від 03.12.86 р., термін «дистанційне зондування» означає зондування поверхні Землі з космосу з використанням властивостей електромагнітних хвиль, які випромінюються, відбиваються або розсіюються зондованими об'єктами, з метою кращого використання природних ресурсів, вдосконалення землекористування та охорони навколишнього середовища. Словник міжнародного космічного права містить визначення дистанційного зондування Землі з космосу як спостереження, що проводяться за допомогою автоматичних супутників, а також з борту космічних кораблів та орбітальних станцій, за різними компонентами земного середовища. Тобто, космічна технологія ДЗЗ базується на спостереженні поверхні Землі з борта космічного апарату, отриманні зображень певних географічних районів (об'єктів) і наступному їх аналізу та інтерпретації в інтересах вирішення поставленої тематичної задачі.

ДЗЗ – інструмент надання об'єктивної інформації для підтримки прийняття адекватних поточних ситуацій оперативних рішень на основі врахування перспективної динаміки процесів різного характеру. ДЗЗ, будучи основним напрямом космічної діяльності, належить до важливих пріоритетів технологічного розвитку, який стимулює підтримку науково-технічного потенціалу країни. Розвиток цього напрямку передбачений Загальнодержавною космічною програмою України на 2013–2017 рр. Отже, актуальним залишається широке залучення в практичну діяльність методів і технологій ДЗЗ для створення ефективних загальноприйнятих варіантів обробки тематичної інформації та створення необхідної матеріально-технічної бази (знімки, програмне

забезпечення, комп'ютери) для проведення наукових досліджень в різних народногосподарських сферах.

Дистанційні методи поділяють на два основних типи: пасивні й активні. *Пасивні методи* ґрунтуються на вимірюванні природного теплового або відбитого сонячного випромінювання. *Активні методи* передбачають використання штучних джерел випромінювання (насамперед лазерів) та реєстрацію відбитого випромінювання або флуоресценції об'єктів, що досліджуються. Сучасні види дистанційних зйомок залежно від типу приймача і способу реєстрації об'єктів і явищ поділяються на 4 види (рис.13.10): *візуальні, фотографічні, фотоелектронні, геофізичні*.



**Рисунок 13.10 – Аерокосмічні методи та види космічних зйомок**

Знімки з космосу та знімки з атмосфери мають багато спільного, хоча можливості в них різні. Аерокосмічні методи сьогодні стали одним з найефективніших способів вивчення земної поверхні.

Головним продуктом аерокосмічних зйомок є *аерофотознімок*, який являє собою двовимірне зображення, що отримане внаслідок дистанційної реєстрації технічними засобами власного або відбитого випромінювання і призначене для виявлення, якісного і кількісного вивчення об'єктів, явищ і процесів шляхом дешифрування, вимірювання і картографування, та є найбільш універсальною формою подання інформації в разі дистанційних досліджень.

Як відмічалось вище, цим методом можна визначити вологість тільки у верхніх шарах ґрунту, які не можуть характеризувати зволоженість всього кореневмісного (зазвичай метрового) шару ґрунту. Однак, на сьогоднішній день немає однозначних методик застосуван-



ня аерокосмічних методів дослідження зволоженості ґрунту. Багато вчених нині працюють в цьому напрямку.

Як приклад на рис. 13.11 наведений прогноз посухи на 20 травня 2020 року за даними технології ДЗЗ.



**Рисунок 13.11 – Прогноз посухи за даними технології ДЗЗ**

Аналізуючи другий, третій і четвертий підходи визначення запасів ґрунтової вологи, слід відмітити, що вони вимірюють не кількість вологи, а непрямі показники, які залежать від вмісту вологи в ґрунті. За цими показниками, залежно від емпіричних тарувальних кривих, визначається вміст вологи. Зазвичай ці прилади таруються за вимірними даними термостатно-вагового методу. Таким чином, на точність визначення вологості ґрунту, використовуючи методи другого, третього і четвертого підходів, крім похибки визначення самих непрямих показників, накладаються і похибки тарування приладів, а також похибки таруючого (термостатно-вагового) методу. Тому ці підходи оцінки запасів ґрунтової вологи не отримали широкого розповсюдження на практиці.

Аналіз патентної, науково-технічної літератури та інформації, представленої у мережі Internet, присвяченої аерокосмічним методам контролю стану поверхні землі, зокрема, рослинності і ґрунтів дає підстави стверджувати, що при розробці методів такого контролю, наземним методам і засобам контролю приділяється мало уваги. Розроблені моделі оцінки стану рослин і ґрунту за супутниковими даними, що базуються переважно на законах оптики, термодинаміки та

інших фізичних законах, завжди потребуватимуть експериментальної перевірки в наземних умовах. А для цього необхідна надійна наземна мережа контролю стану рослин і ґрунту. Однак при цьому виникають дуже складні і, тим не менше, важливі проблеми, пов'язані з особливостями аерокосмічних і наземних методів.

### **13.6. Приклад розрахунку прогнозування поливу при відомих запасах вологи**

Якщо є можливість вимірювати запаси вологи протягом всієї вегетації то немає необхідності в їх послідовних розрахунках балансовими методами. Для прийняття рішень про проведення поливів можна використовувати виміряні їх значення. В меліоративній практиці для таких потреб використовують, частіше за все, тензометричні системи дистанційного агрометеорологічного поста.

Розглянемо приклад прогнозування початку першого вегетаційного поливу за показаннями тензіометрів. Прогнозування проводиться за добовою інтенсивністю (швидкістю) зниження тензометричного тиску ґрунту для організації й коригування норми поливу агрокультури на всіх ділянках площі зрошення. Поливи призначають раніше в межах оптимального діапазону вологості, що рекомендується в кожному фазу росту і розвитку, щоб не допустити зниження вологості кореневого шару ґрунту нижче передполивного значення.

#### ***Вправа 13.1* Розрахунок прогнозування поливу**

Вихідні дані та умови:

- культура – озима цибуля;
- площа насаджень – 10 га;
- за добу зрошують 5 га;
- рекомендована норма поливу становить 175 м<sup>3</sup>/га;
- схема висіву – 5+25+5+25+5+25 +5+65 (160 см). Один поливний трубопровід рівномірно зволожує дві спарені посівні стрічки;
- глибина зволоження – 40 см. Глибина зволоження обумовлюється не глибиною кореневого шару ґрунту, а схемою висіву цибулі і розміщенням поливних трубопроводів;
- ширина смуги зволоження – 65 см;
- ґрунт легкосуглинковий, найменша вологемність ґрунту (НВ) становить 29 % від об'єму ґрунту;
- тензіометри встановлені на глибині 15–20 см;
- рівень передполивної вологості становить 80 % від НВ, що відповідає ґрунтовому тиску –35 кПа.

У перший день ранкових спостережень (2 квітня) значення тензометричного тиску в трьох точках контролювання кореневого шару ґрунту на ділянці од-

ночасного поливу (5 га) зафіксовано на рівні  $-18$ ;  $-19$ ;  $-19$  кПа; середнє значення  $-19$  кПа. Через 2 дні (4 квітня) зафіксовано  $-22$ ;  $-24$ ;  $-23$  кПа; середнє значення  $-23$  кПа.

Коли розпочинати полив?

*Розв'язок*

1. Визначають середньодобову зміну тензометричного тиску ґрунту за 2 дні:  
 $-4$  кПа:  $2 = -2$  кПа/добу.
2. Визначають різницю між передполивним і поточним значеннями тензометричного тиску:  $-35 - (-23) = -12$  кПа.
3. Визначають кількість днів, протягом яких тензометричний тиск знизиться до передполивного:  $-2 : -2 = 6$  діб.

Щоб не допустити зниження вологості ґрунту нижче оптимальних значень на другій поливній ділянці озимої цибулі, полив розпочинають не 10-го, а 9-го квітня. Тензометричний тиск перед поливами становитиме: 9-го квітня  $-33$  кПа на першій ділянці, 10-го квітня  $-35$  кПа на другій ділянці. Норма поливу озимої цибулі також зміниться від  $165$  м<sup>3</sup>/га в перший поливний день до  $175$  м<sup>3</sup>/га у другий.

### ***Питання для самоконтролю***

1. *Яке основне завдання оперативного планування поливів?*
2. *Які застосовують засоби для автоматизованого планування поливного режиму сільськогосподарських культур?*
3. *Які основні завдання організації оперативного поливного режиму?*
4. *Як встановлюють черговість проведення поливів сільськогосподарських культур?*
5. *Які недоліки та проблеми впровадження інформаційно-дорадчих систем?*
6. *Які застосовують методи і засоби вимірювання запасів вологи в ґрунті?*
7. *Які використовують засоби безпосереднього визначення вологості відібраного зразка ґрунту?*
8. *Які застосовують групи непрямих методів вимірювання вологості ґрунту?*
9. *В чому сутність електромагнітних електроємнісних методів визначення вологості ґрунту? Які розроблені прилади цього підходу?*
10. *Яким чином вимірюють вологість ґрунту приладами, розробленими на принципі ядерних методів?*
11. *Яким чином визначають запаси вологи в ґрунті тензіометрами?*
12. *Яка особливість застосування автоматизованих агрометеорологічних постів (ААП)?*
13. *Як визначають вологість ґрунту при дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ)?*
14. *Яким чином можна прогнозувати поливи при відомих вимірних вологозапасах?*

## **14. РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ ЗРОШЕННЯ АГРОГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИМ МЕТОДОМ О.Ф. ЛИТОВЧЕНКА**

Усі розглянуті методи розрахунку режимів зрошення застосовують рівняння водного балансу і відрізняються, в основному, методами визначення сумарного водоспоживання. Кожен розробник намагався розробити такий метод, який давав би найкращі результати саме для визначення сумарного водоспоживання. При цьому ставились завдання, що метод повинен бути універсальним. Універсальність полягала у визначенні сумарного водоспоживання під більшість сільськогосподарських культур і їх різні фази розвитку, а також для більшості регіонів світу. Якщо більшість методів за місячні і декадні періоди дають непогані результати і можуть використовуватись для розрахунку проектних і експлуатаційних сезонних режимів зрошення, то для оперативного планування поливів (добового водоспоживання) вони дають значні похибки. Найбільш обґрунтованим методом визначення евапотранспірації є метод ФАО, який ґрунтується на формулі Пенмана-Монтейна визначення сумарного водоспоживання еталонної культури і застосування коефіцієнтів, які б дали можливість враховувати особливості культури, зволоження та інші фактори.

Інші показники водного балансу визначаються з різною точністю. Найбільша точність вимірювання атмосферних опадів, а, наприклад, втрати їх на поверхневий і глибинний стік визначаються дуже приблизно, тому загальні запаси вологи також мають відносно велику похибку, так як від декади до декади, похибка може накопичуватись. Тому при розрахунку режимів зрошення (запасів вологи в ґрунті) в конкретні роки, не можна обійтися без початкових та контрольних вимірювань вологозапасів.

Для вирішення проблем пов'язаних з визначенням ґрунтових вологозапасів на кафедрі водогосподарської інженерії під керівництвом професора О.Ф. Литовченка розроблений принципово новий метод розрахунку вологозапасів під посівами основних сільськогосподарських культур в умовах степової і лісостепої зони України. Цей метод дозволяє, маючи мінімальну метеорологічну інформацію (дані про атмосферні опади, температуру і дефіцит вологості повітря) розрахувати запаси вологи в метровому та півметровому шарах ґрунту, з достатньою для практичного використання точністю протягом всього вегетаційного періоду (Литовченко А.Ф., 2011). На основі цього методу

розроблена методика визначення запасів вологи як незрошуваних так і зрошуваних земель. Виходячи із цього розроблений метод розрахунку режимів зрошення для конкретного року з однаковою точністю протягом всього вегетаційного періоду.

На підставі цього агрогідрометеорологічного методу можна розробляти нові інформаційно-дорадчі системи оперативного планування поливами. Така принципово нова інформаційна система була розроблена вперше для умов Солонянсько-Томаковської зрошувальної системи в 1995 році та ПП «Перемога АВК» в 2017 році.

### 14.1. Розрахунок показника попередніх погодних умов

Запаси ґрунтової вологи в метровому і півметровому шарах ґрунту за агрогідрометеорологічним методом розраховуються на підставі комплексного показника погодних умов, який чисельно враховує погодні умови, попередні дати визначення ґрунтових вологозапасів, для весняно-літнього періоду розраховуються за формулою

$$P = \frac{1000S_0}{\sum d \sqrt{\sum t}}, \quad (14.1)$$

де  $\sum d$  – сума середньодобових дефіцитів вологості повітря (мб) за період від дати переходу температури повітря через +5 °С весени попереднього року до дати визначення вологозапасів;

$\sum t$  – сума середньодобових ефективних температур повітря за період від дати їх переходу через +5 °С навесні до дати визначення ґрунтових вологозапасів;

$S_0$  – зважена за часом сума попередніх атмосферних опадів, яка визначається за формулою

$$S_0 = \sum_1^2 (h_i + m_i) + 0,8 \sum_3^{10} (h_i + m_i) + 0,6 \sum_{11}^{20} (h_i + m_i) + 0,4 \sum_{21}^{30} (h_i + m_i) + 0,3 \sum_{31}^{40} (h_i + m_i) + 0,2 \sum_{41}^{50} (h_i + m_i) + 0,1 \sum_{51}^n (h_i + m_i), \quad (14.2)$$

де  $\sum_1^2 (h_i + m_i)$ ,  $\sum_3^{10} (h_i + m_i)$ , і т.д. – сума атмосферних опадів з врахуван-

ням норм проведених поливів за першу-другу, третю-десяту і т.д. добу до розрахункової дати;

$\sum_1^n (h_i + m_i)$  – сума опадів і поливна норма за період від дати перехо-

ду температури повітря через  $+5^\circ\text{C}$  восени попереднього року до дати, яка закінчується за 50 діб до розрахункового дня.

Очевидно, вагові коефіцієнти опадів в цій формулі повинні бути тим більше, чим ближче за часом вони випадають до дати визначення ґрунтових вологозапасів, що враховується формулою.

Зазначимо, що при розрахунках комплексного показника попередніх погодних умов за формулою (14.1) сума ефективних температур у весняно-літній період для різних сільськогосподарських культур враховується по різному. Так, для озимої пшениці, якщо  $\sum t < 170^\circ\text{C}$ , то  $\sum t$  приймається  $170^\circ\text{C}$ ; для кукурудзи при  $\sum t < 1000^\circ\text{C}$  приймається  $\sum t = 1000^\circ\text{C}$ ; для ячменю ярого при  $\sum t < 200^\circ\text{C}$  приймається  $\sum t = 200^\circ\text{C}$ .

В результаті ретельного сумісного аналізу багаторічних даних спостережень (вимірювань) над опадами і ґрунтовими вологозапасами вдалось виявити оптимальні значення часових коефіцієнтів при розрахунках сум попередніх опадів. Рівняння (14.2) відображає експоненціальну закономірність і може застосуватись експоненціальна функція

$$S_0 = 0,97 e^{-\beta T} \sum_1^n (h_i + m_i), \quad (14.3)$$

де  $\beta$  – показник ступеня експоненти, який дорівнює 0,025 для весняно-літнього періоду, і 0,0125 – для осінньо-зимового періоду;

$T$  – кількість діб від початку підсумовування добових значень атмосферних опадів і поливних норм.

Для осінньо-зимового періоду комплексний показник попередніх погодних умов  $P_S$  рекомендується визначати за дещо іншою формулою, а саме:

$$P_S = \frac{1000 S_0}{t_{cep} \sqrt{d_{cep}}}, \quad (14.4)$$

де  $S_0$  – сума зважених за часом атмосферних опадів, розрахованих за формулою (14.3);

$t_{cep}$  і  $d_{cep}$  – середні значення відповідно температури в дефіцитів вологості (мб) за період від дати переходу добової температури через  $+15^\circ\text{C}$  весною розрахункового року до дати визна-

чення ґрунтових вологозапасів. Важливо відмітити, що при підсумовуванні температур повітря в зимовий період в розрахунок приймається тільки додатні їх значення.

В рівнянні (14.4) враховуються і зимові опади, які в степовій і лісостеповій зонах України утворюють зазвичай короткотерміновий сніговий покрив, з поверхні якого випаровується приблизно така ж кількість вологи, що і з поверхні мерзлого ґрунту. Тому, вірогідно, без істотних похибок можна умовно віднести їх до дощових (рідких) опадів.

## 14.2. Розрахунок запасів вологи під різними сільськогосподарськими культурами

Запаси ґрунтової вологи в метровому і півметровому шарах ґрунту за агрогідрометеорологічним методом розраховують за формулою

$$W = (c - a \cdot e^{-b \cdot P}) \varphi_R, \quad (14.5)$$

де  $W$  – запаси вологи в розрахунковому метровому чи півметровому шарі ґрунту на кожен або будь-який день розрахункового вегетаційного періоду, мм;

$a$ ,  $b$ ,  $c$  – емпіричні параметри, що характеризують природні умови місцевості (їх значення різні для різних культур і залежать від потужності розрахункового шару ґрунту);

$e$  – основа натуральних логарифмів;

$P$  – комплексний показник попередніх погодних умов, який можна розрахувати за формулами (14.1) або (14.4). Залежно від розрахункового періоду (весняно-літнього чи осінньо-зимового);

$\varphi_R$  – коефіцієнт рельєфу місцевості, який впливає на вологозапаси експозиції (орієнтації) і крутизни схилу, на якому розташована дослідна ділянка (на схилах південної експозиції при крутизні  $5^\circ$   $\varphi_R=1,04$ , північної –  $\varphi_R=0,93$ ; а при крутизні схилу  $10^\circ$  – відповідно  $1,06$  і  $0,86$ ).

Для визначення параметру  $\varphi_R$  можна скористатись розробками Романової Е.Н., яка запропонувала вводити мікрокліматичний коефіцієнт для схилів різної крутизни і експозиції. Для різних експозицій його можна розрахувати за формулами:

- південна експозиція  $\varphi_R = 1 + 0,01\alpha$ ;
- північна експозиція  $\varphi_R = 1 - 0,0014\alpha$ ;
- східна експозиція  $\varphi_R = 1 - 0,001\alpha$ ;

- західна експозиція  $\varphi_R = 1 - 0,002\alpha$ .

де  $\alpha$  – крутизна схилу, град. Діапазон схилу може бути від 0 до 20°.

Запропонований коефіцієнт може крім того змінюватись за порами року. Так, для весни даний коефіцієнт складає:

- південна експозиція  $\varphi_R = 1 + 0,010\alpha$ ;

- північна експозиція  $\varphi_R = 1 - 0,016\alpha$ ;

- східна експозиція  $\varphi_R = 1 + 0,002\alpha$ ;

- західна експозиція  $\varphi_R = 1 - 0,001\alpha$ .

влітку:

- південна експозиція  $\varphi_R = 1 + 0,005\alpha$ ;

- північна експозиція  $\varphi_R = 1 - 0,010\alpha$ ;

- східна експозиція  $\varphi_R = 1 + 0,0002\alpha$ ;

- західна експозиція  $\varphi_R = 1 - 0,003\alpha$ .

На схилових землях цей коефіцієнт може змінюватись і від форми схилу (прямий, ввігнутий чи випуклий), і від положення на схилі (вершина, верхня частина, нижня частина, підніжжя). Для різних варіантів значення  $\varphi_R$  наведені в табл. 14.1.

Запропонована математична модель (14.5) враховує 8 основних факторів, які впливають на режим формування і величину ґрунтових вологозапасів. Це атмосферні опади і поливні норми, температура і дефіцит вологості повітря; фенологічна фаза розвитку сільськогосподарської культури, яка враховується сумою ефективних температур; запас ґрунтової вологи на початок вегетації, обумовлений ґрунтовими різновидами і режимом погодних умов. Очевидно, його значення буде залежати ще і від типу і гранулометричного складу ґрунту (параметр  $c$ ). Річну амплітуду змін ґрунтових вологозапасів в досліджуваних природних умовах характеризує параметр  $a$ . Режим витрачання ґрунтової вологи на транспірацію різними сільськогосподарськими культурами відображає параметр  $b$ . Емпіричні параметри  $a$ ,  $b$  і  $c$  для метрового і півметрового шарів ґрунту в степовій і лісостеповій зонах України наведені в монографії О.Ф. Литовченка (Литовченко А.Ф. 2011), а в табл. 14.2 наведені коефіцієнти для умов Дніпропетровської області.

Запаси вологи в орному шарі ґрунту (0–20 см) досить тісно (коефіцієнт кореляції зазвичай більше 0,90) і прямолінійно залежать від вологозапасів в півметровому шарі, що дає можливість обґрунтовано осереднити їх параметри.



**Таблиця 14.1 – Коефіцієнт зволоженості ( $\varphi_R$ ) для достатньо вологої, сла-  
бопосушливої, посушливої і дуже посушливої зони**

Форма рельєфу	Пора року			
	весна	літо	осінь	в середньому
Схил прямого і ввігнутого профіля				
Вершина	0,54	0,46	0,42	0,47
Північний схил				
- верх	1,00	0,86	0,98	0,95
- середина	1,00	1,00	1,00	1,03
- нижня частина	1,50	1,49	1,08	1,36
- підніжжя	2,00	1,50	1,60	1,70
Південний схил				
- верх	0,45	0,41	0,37	0,41
- середина	0,62	0,50	0,48	0,53
- нижня частина	0,93	0,93	0,96	0,95
- підніжжя	1,22	1,20	1,14	1,19
Схили випуклого профілю				
Вододільне плато	1,00	1,00	1,00	1,00
Північний схил				
- верх	0,96	0,97	0,98	0,97
- середина	1,03	1,00	1,00	1,01
- нижня частина	1,03	0,92	0,82	0,92
- підніжжя	2,18	1,88	1,99	2,02
Південний схил				
- верх	0,85	0,82	0,76	0,81
- середина	0,73	0,77	0,71	0,74
- нижня частина	0,78	0,72	0,66	0,72
- підніжжя	1,22	1,18	1,14	1,18

В результаті територіального осереднення параметрів в степовій зоні отримана одна формула для визначення добових вологозапасів в орному шарі ґрунту (0–20 см) за вологозапасами в шарі 0–50 см; вона має вигляд

$$W_{20} = 0,42W_{50} - 4. \quad (14.6)$$

Похибки обчислених вологозапасів в орному шарі (0–20 см) за цією формулою не перевищують 15 % (4,5 мм), що можна вважати досить придатним для практичного використання.

Розрахункові значення щоденних запасів ґрунтової вологи можна визначати і у інших шарах метрової ґрунтової товщі. Враховуючи відносно плавні зміни (розподіл) вологозапасів за глибиною ґрунтового профіля, тобто по епюрі розподілу вологозапасів за глибиною профіля, встановлені тісні їх кореляційні зв'язки. Це дозволило суттєво

збільшити кількість розрахункових шарів ґрунту в досліджуваних умовах. Так, розрахунковим шляхом можна визначати щорічні запаси ґрунту в шести шарах метрового профілю ґрунту:

**Таблиця 14.2 – Емпіричні параметри  $a$ ,  $b$  і  $c$  формули (14.5) для розрахунку щоденних вологозапасів в метровому і півметровому шарах ґрунту в умовах Дніпропетровської області**

Метеостанція	Метровий шар			Півметровий шар		
	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$
<b>Кукурудза</b>						
Губиниха	155	0,630	293	92	0,612	148
Комісарівка	166	0,399	193	97	0,396	146
Синельникове	181	0,534	309	121	0,480	151
Чаплине	146	0,499	319	93	0,415	163
Лошкарівка	125	0,379	281	76	0,387	138
Кривий Ріг	128	0,438	291	79	0,449	146
Апостолове	146	0,494	302	89	0,433	155
Нікополь	190	0,489	269	112	0,500	140
<b>Ярий ячмінь</b>						
Губиниха	175	0,182	290	103	0,176	152
Комісарівка	179	0,146	296	109	0,182	147
Синельникове	191	0,207	310	115	0,211	156
Чаплине	183	0,175	327	109	0,179	166
Лошкарівка	170	0,208	283	94	0,221	138
Кривий Ріг	128	0,206	284	70	0,213	139
Нікополь	192	0,225	262	113	0,206	140
<b>Пшениця озима – весняно-літній період</b>						
Губиниха	143	0,154	277	90	0,144	148
Комісарівка	161	0,136	295	101	0,145	152
Синельникове	194	0,143	319	109	0,125	161
Чаплине	159	0,141	327	90	0,140	168
Лошкарівка	144	0,148	287	83	0,128	142
Кривий Ріг	138	0,190	287	73	0,156	142
Апостолове	140	0,130	311	94	0,166	170
Нікополь	187	0,176	272	103	0,122	146

- 1) в орному 20-сантиметровому шарі – за емпіричною формулою (14.6);
- 2) в шарі 20–50 см – за співвідношенням  $W_{20-50} = W_{50} - W_{20}$ ;
- 3) в шарі 0–50 см – за формулою (14.5);
- 4) в шарі 0–75 см за співвідношенням  $W_{75} = W_{50} + 0,5(W_{100} - W_{50})$ ;
- 5) в метровому шарі – за емпіричною формулою (14.5);
- 6) в другому півметровому шарі ґрунту за співвідношенням  $W_{50-100} = W_{100} - W_{50}$ .

Щоденні вологозапаси в різних шарах ґрунту необхідні для постійного контролю і корегування строків і норм поливу в процесі проведення зрошення культур з врахування погодних умов, що склались в поточному році.

**Вправа 14.1 – Розрахунок запасів води в ґрунті на задану дату вегетації агрогидрометеорологічним методом проф. О.Ф. Литовченка**

Дано: 1. Метеорологічні величини за даними метеостанції Синельникове в 2013–2014 рр. (табл. 14.3–14.5).

2. Ґрунт – чорнозем звичайний малогумусний, мулувато-крупнопилуватий, важкосуглинковий. Нормативні запаси ґрунтової води наведені в табл. 14.6.

**Таблиця 14.3 – Суми добових атмосферних опадів (мм) за даними метеостанції Синельникове в 2013–2014 рр.**

Дата	Місяць												
	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09
1			0,3		0,1					20,0			
2	0,6	0,1		0,7					14,0	6,0			
3		31,0											
4		8,0						3,8		26,0			
5	5,0						0,5		12,0				
6	8,0												
7	3,5		3,0	0,1	2,0			1,0			4,3		
8	4,0			0,2		0,5		7,0		4,0	4,0		
9				2,1	0,1	0,8							
10				4,2	0,1	1,5		3,0	0,6			3,0	
11		1,2			2,0	1,4		28,0		2,3		4,0	1,0
12					3,0			1,0			1,2		
13			1,6		0,8				1,0				
14	3,4		2,4	0,4	0,1		5,0						
15	6,0					1,3	8,0				4,0		
16		5,4			4,0	0,2	0,9						
17		0,7			0,2	2,0	0,3	6,0		0,3	2,0	0,3	
18		22,6	0,1		4,9	0,8	2,3	2,0	3,0	17,0	1,7	26,0	
19	1,0	8,0						0,4	2,0				
20	10,6				0,4	1,3			15,4	0,6			
21										34,0	13,0		
22	1,5	4,4			11,3						0,2		
23	12,0				1,2					0,3			9,6
24										3,0	1,5		15,1
25	2,0		1,1							15,0			6,0
26		0,1	0,8			0,8			1,2	48,0			
27	8,0				0,8	1,2			3,0	2,5			
28	0,1				26,0	0,1				0,6		16,3	
29	5,0	0,1	2,0		1,5			5,0	4,0				
30		0,2	0,1					0,8	6,3				
31		0,1							24,0				

**Таблиця 14.4 – Середньодобовий дефіцит вологості повітря (мб) за даними метеостанції Синельникове в 2013–2014 рр.**

Дата	Місяць												
	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09
1	8,1	2,5	3,3	1,2	1,2	1,0	0,5	3,1	4,3	6,0	16,1	22,3	15,0
2	7,7	3,2	3,5	1,5	0,9	0,9	0,7	3,4	3,8	5,3	8,9	26,0	17,5
3	8,9	0,4	1,4	1,8	0,8	0,8	1,6	4,6	6,5	12,4	10,9	24,5	16,6
4	4,0	0,6	1,7	2,4	0,4	1,0	0,5	1,2	6,7	5,8	11,7	18,5	11,3
5	1,1	1,5	0,7	1,6	0,4	0,9	0,8	3,4	1,7	12,2	12,6	13,7	9,3
6	1,5	2,5	4,8	0,8	0,1	0,4	2,0	5,4	5,4	17,2	11,1	15,8	12,2
7	2,1	3,2	1,7	1,4	0,7	0,1	2,7	6,8	7,3	17,2	2,4	17,2	15,9
8	2,3	2,7	1,7	0,9	0,8	0,5	3,3	6,9	6,8	8,1	8,7	16,9	11,7
9	1,7	3,2	2,3	0,7	0,8	0,1	4,0	5,4	8,6	9,9	8,1	18,8	7,2
10	4,6	2,2	3,1	0,7	0,2	0,1	3,4	0,9	7,1	8,4	12,4	15,5	5,6
11	9,3	5,7	0,7	0,6	1,6	0,0	5,9	0,9	2,2	3,9	15,4	11,7	8,7
12	9,6	0,1	0,7	1,1	0,9	0,4	4,1	1,7	6,4	8,5	15,3	14,6	13,3
13	8,6	2,9	0,5	0,5	1,1	2,0	4,5	0,5	2,0	5,9	12,3	24,0	9,7
14	6,2	3,5	1,0	0,7	1,1	0,9	6,7	1,5	4,7	9,1	7,8	25,5	11,6
15	4,1	3,4	2,0	0,5	0,9	0,1	7,4	3,7	11,2	8,1	6,3	29,8	8,6
16	2,5	0,4	2,3	0,8	0,9	0,1	2,6	4,7	15,9	8,6	17,3	15,6	6,1
17	4,6	0,7	0,4	0,4	0,9	0,2	1,7	8,2	16,0	7,2	10,7	10,4	8,4
18	5,0	0,5	2,1	0,6	0,4	0,6	2,2	11,7	7,7	5,3	6,2	2,4	8,8
19	3,6	1,4	1,9	0,2	0,8	1,6	2,8	5,4	5,5	9,1	8,5	9,6	9,8
20	1,9	2,7	1,3	0,6	0,8	0,7	2,0	3,4	6,9	7,9	14,6	15,7	9,7
21	2,3	1,4	1,4	0,9	1,1	1,6	3,5	3,0	14,7	3,2	7,7	12,9	9,0
22	2,5	1,4	0,8	1,2	0,3	2,0	5,8	4,8	16,4	9,8	7,7	7,1	6,9
23	1,3	2,0	0,7	0,6	0,6	1,7	6,7	6,8	17,0	9,1	12,0	7,7	2,0
24	2,3	3,4	1,2	0,3	0,5	0,8	6,7	7,2	19,6	7,9	13,8	11,9	0,6
25	1,4	0,4	1,5	0,6	0,4	1,3	9,9	7,6	18,9	5,6	18,3	9,2	1,1
26	3,9	0,8	1,5	0,3	0,6	0,8	9,7	9,4	16,5	2,0	15,3	12,2	2,4
27	2,6	0,4	1,2	0,4	0,6	0,6	6,1	10,7	9,7	2,6	16,4	16,8	3,4
28	2,5	0,4	1,5	0,0	0,5	0,5	2,9	7,6	9,8	6,8	16,3	3,7	4,2
29	1,9	0,1	1,2	0,2	0,6		4,1	1,1	7,0	9,8	17,7	6,3	4,0
30	1,8	0,0	0,7	0,3	0,5		5,1	2,4	5,8	13,3	21,3	7,0	5,4
31		2,3		0,3	0,6		7,0		2,2		20,7	11,1	

**Таблиця 14.6 – Запаси ґрунтової вологи (загальні), мм**

Шар ґрунту, см	Непродутривна волога	При НВ	0,70НВ	0,75НВ	0,80НВ
0–20	25,3	65,7	46,0	49,3	52,6
0–50	67,6	157,0	109,9	117,8	125,6
0–75	107,4	233,2	163,2	174,9	186,6
0–100	148,1	311,1	217,8	233,3	248,9

**Таблиця 14.5 – Середньодобова температура повітря (°C) за даними метеостанції Синельникове в 2013–2014 рр.**

Дата	Місяць												
	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09
1	17,9	5,5	6,4	1,7	0,1	-16,0	0,7	3,8	12,8	19,6	23,4	26,3	22,0
2	18,1	5,8	8,7	1,5	-0,6	-13,0	2,4	0,5	14,6	19,6	20,5	28,0	23,7
3	17,0	1,4	10,2	-4,0	-0,4	-11,0	4,3	2,5	15,6	20,3	19,4	28,1	23,4
4	13,5	1,4	12,6	-2,0	0,9	-9,9	4,5	2,9	15,4	18,8	20,1	26,5	20,3
5	11,5	1,5	12,7	0,0	1,0	-9,2	6,4	2,4	12,2	21,8	21,1	25,0	17,3
6	10,2	3,1	13,0	-0,2	1,0	-9,5	6,5	3,8	8,6	24,4	21,6	24,4	19,6
7	11,8	6,3	9,0	-0,4	2,3	-6,3	3,6	7,2	11,2	25,0	17,1	24,3	22,0
8	12,8	8,7	7,0	-0,6	1,8	-1,4	2,5	10,7	12,0	23,2	21,4	24,5	20,1
9	12,2	9,0	9,7	-2,1	4,0	1,4	2,6	14,0	15,2	22,6	20,0	24,4	18,5
10	14,6	9,0	7,8	-6,7	2,8	3,0	2,9	8,5	18,2	20,4	22,7	24,9	17,1
11	18,6	13,0	4,8	-12,0	4,3	2,0	5,8	2,6	15,9	17,4	25,0	23,5	17,8
12	18,8	7,8	5,1	-11,0	2,3	4,3	5,5	5,2	17,7	17,3	25,0	24,1	18,8
13	17,7	9,2	6,8	-6,6	0,6	6,7	4,9	5,8	13,8	17,6	23,8	27,8	17,8
14	18,8	10,0	4,6	-1,9	-2,6	5,1	8,1	8,2	16,5	18,0	21,8	28,8	17,8
15	14,7	11,9	2,6	-7,3	-1,0	2,9	9,0	10,0	20,9	17,0	20,3	29,9	15,7
16	13,5	11,5	2,8	-4,1	3,2	2,0	4,9	11,7	23,5	18,1	25,7	24,5	14,0
17	15,6	12,3	3,7	-0,9	-1,9	2,2	1,6	14,9	24,5	17,9	22,6	21,0	14,3
18	17,0	12,7	4,9	-1,1	1,1	1,5	3,7	17,0	21,7	17,2	21,3	16,0	12,1
19	14,3	7,8	1,9	-1,0	-4,8	3,0	7,2	15,3	20,4	16,3	22,5	19,2	13,3
20	12,7	4,2	2,2	1,9	-9,3	4,6	7,9	14,4	19,9	17,7	23,9	22,3	14,1
21	12,7	9,0	5,1	2,2	-8,6	3,8	4,2	13,4	21,0	16,1	20,3	21,5	13,1
22	12,7	11,4	4,7	0,3	-7,6	3,0	7,2	14,8	21,8	18,4	20,6	20,4	14,4
23	10,6	6,0	3,9	1,7	-9,3	0,6	9,7	15,6	22,3	18,5	22,8	17,3	15,8
24	9,7	5,6	4,1	1,7	-14,0	-1,0	11,0	14,3	22,8	18,3	23,8	19,3	8,2
25	9,7	6,0	7,0	2,7	-16,0	-0,9	13,7	9,7	23,5	19,0	24,9	19,8	7,9
26	10,0	9,1	3,4	0,1	-14,0	-3,0	13,3	12,2	24,2	18,2	24,1	18,4	10,5
27	9,5	9,8	0,6	1,6	-12,0	-0,1	10,8	14,7	21,7	14,3	24,1	23,2	12,6
28	6,5	11,2	1,4	0,4	-12,0	0,5	9,9	14,0	21,5	16,0	23,1	17,4	12,9
29	7,5	9,0	1,6	0,3	-16,0		1,4	11,6	20,8	17,3	23,6	15,4	11,5
30	5,5	8,3	0,9	0,2	-21,0		2,5	13,3	20,5	21,2	26,1	15,8	14,0
31		9,4		-0,8	-2,0		6,9		17,7		25,9	18,7	

Необхідно: 1. Розрахувати запаси вологи в метровому і півметровому шарах ґрунту на 1.04.2014, 1.05.2014, 1.06.2015, 1.07.2014, 1.08.2014 і 1.09.2014 під посівами кукурудзи.

2. Побудувати графік ходу запасів вологи в різних шарах ґрунту.

*Розв'язок:*

Запаси вологи в метровому і півметровому шарах ґрунту розраховують за формулами (14.2), (14.1) і (14.5). Результати розрахунку зведені в табл. 14.7.

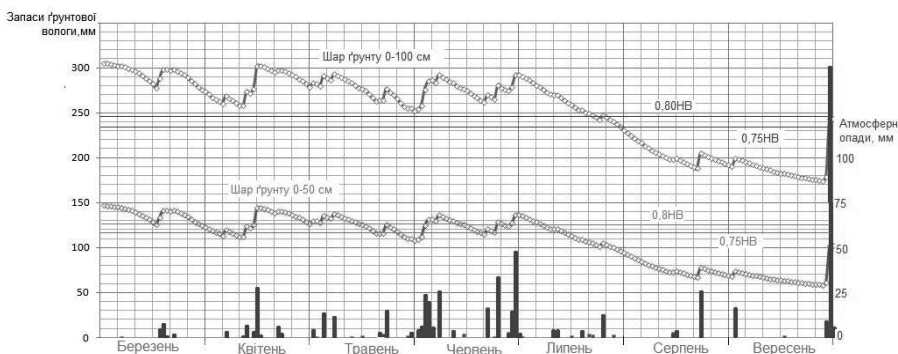
**Таблиця 14.7 – Результати розрахунку запасів води в різних шарах ґрунту**

Дата	$\sum_1^2 h_i$	$\sum_3^{10} h_i$	$\sum_{11}^{20} h_i$	$\sum_{21}^{30} h_i$	$\sum_{31}^{40} h_i$	$\sum_{41}^{50} h_i$	$\sum_{51}^n h_i$	$S_0$	$\sum d$	$\sum t$	$P$	$W_{50}$ , мм	$W_{100}$ , мм
1.04.21	0	0	16,5	0,5	2,1	7,0	79,4	21,6	243,5	0	2,61	116	265
1.05.21	0,8	5,0	37,4	14,8	0	16,5	89,0	46,7	386,9	138,7	3,71	131	285
1.06.21	30,3	8,2	21,4	26,6	13,0	37,4	117,5	85,0	661,2	557,1	3,99	133	288
1.07.21	0	103,4	20,2	56,0	38,6	21,4	194,3	154	907,4	974,6	5,32	142	299
1.08.21	0	14,7	8,9	8,3	103,4	20,2	310,3	88,1	1292	1523	1,72	98	237
1.09.21	0	16,3	30,3	3,0	14,7	8,9	422,0	84,1	1746	2074	1,02	77	204

При розрахунках прийняті такі дані: дата переходу температури через +5 °С восени 1.011.2013, дата переходу температури через +5 °С навесні 11.04.2014; параметри  $a_{50} = 121$ ,  $b_{50} = 0,480$   $c_{50} = 151$ ,  $a_{100} = 181$ ,  $b_{100} = 0,534$   $c_{100} = 309$  (див. табл. 14.2).

Провівши розрахунки запасів води в метровому і півметровому шарах ґрунту в 2014 році можна зробити висновки, що за рахунок рясних дощів в травні і на початку літа запаси води під посівами кукурудзи в метровому і півметровому шарах не знижуються нижче рівня 0,80НВ, що свідчить про добру зволоженість посівів. В півметровому шарі ґрунту до 1.08.2014 рівень зволоження знизиться до 98 мм (0,62 НВ), до 1.09.2014 – 77 мм (0,49 НВ). В метровому шарі запаси води будуть дещо більшими – на 1.08.2014 – 237 мм (0,75НВ), 1.09.2014 – 204 мм (0,65 НВ). Липень і вересень кінець вегетації кукурудзи (молочна, воскова і повна стиглість), в цей період врожай зерна кукурудзи вже сформований, так що зниження запасів води в цей період не призведе до значної втрати врожаю.

Більш детальну інформацію про зволоженість вегетації в 2014 році можна отримати розрахувавши запаси води на кожен день і побудувавши графік їх ходу протягом всього вегетаційного періоду (рис. 14.1).



**Рисунок 14.1 – Графік ходу запасів води під посівами кукурудзи розрахований за даними метеостанції Синельникове в 2014 р.**

Аналіз графіку (рис. 14.1) свідчить про добру зволоженість посівів кукурудзи 2014 році. Якщо зниження запасів вологи і відбувались в цьому році на короткий термін нижче критичного рівня, то за рахунок рясних дощів відбувся підйом зволоженості ґрунту. Тільки в кінці вегетації (кінець липня – серпень) запаси вологи знизались нижче критичного рівня. В цей період буде спостерігатись кінець критичного періоду кукурудзи. Тому для забезпечення високого врожаю зерна кукурудзи бажано провести хоча би один полив.

Великий дощ (151 мм) в кінці вересня привів до підвищення вологості зерна в качанах і зниження якості зерна.

### **14.3. Встановлення поливного режиму сільськогосподарських культур конкретного року**

Знаючи запаси вологи на кожен день можна встановити необхідність поливу, якщо вони знизяться нижче критичного рівня, або будуть до нього наближатися.

Сутність запропонованого методу розрахунку режиму зволоження (кількості поливів, строків і поливних норм) для конкретного розрахункового року полягає у визначенні за фрагментарним гідрографом щоденних природних (наявних) вологозапасів і дефіцитів вологи за різницею між потрібними і наявними вологозапасами в розрахунковому шарі ґрунту. На відміну від розглянутих вище воднобалансових методів запропонований агрогідрометеорологічний метод дає можливість чітко встановити розрахунковий кореневмісний шар ґрунту і рівень його зволоженості. На цьому принципі побудована методика розрахунку водозберігаючого методу, тобто не витратити зайвої води.

Для зручності і наочності гідрограф доцільно розбити на три фрагменти: докритичний, критичний і післякритичний періоди (рис. 14.1). За необхідності можна розглянути більше періодів і більше шарів.

Фрагментарний гідрограф добових вологозапасів в різних (необхідних для розрахунку) шарах ґрунту будують за фрагментами, тобто за фенологічними фазами розвитку зрошуваної культури, і з необхідністю врахування зазвичай нерівномірного за часом споживання вологи протягом всього періоду вегетації. На осі ординат відкладають у вибраному масштабі добові значення вологозапасів у міліметрах, а на осі абсцис – час в добах. Для цього використовують добові значення розрахункових вологозапасів, осереднених за ковзних трьохденках, тобто за статистичним фільтром. Такий період осереднення є найбільш вдалим, так як він добре згладжує різкі коливання вологозапа-

сів за рахунок рясних дощів і поливів, суттєво не змінюючи обриси гідрографа. На гідрографі відмічають і хід природних (без зрошення) розрахункових вологозапасів в різних шарах ґрунту ( $W$ ), хід оптимальних вологозапасів в до критичний, критичний і післякритичний періоди ( $W^*$ ). Поряд з цим на гідрографах, як правило, вказують передполивний (нижній) рівень зволоження ґрунтового профіля ( $W'$ ). Гідрограф може бути побудований з врахуванням культури, господарських можливостей і у випадку необхідності в шести різних шарах метрового профіля ґрунту.

Паралельно на графік наносять (крім фрагментів гідрографа) ще і хід атмосферних опадів справа внизу у вигляді потовщених вертикальних ліній і хід поливів у вигляді вертикальних порожнинних ліній різної довжини, у відповідності з розрахованими поливними нормами (масштаб поливних норм і опадів для зручності приймають однаковим). Як правило, в критичний і інші періоди, які зазвичай, характеризуються аномальними умовами погоди, доцільно подавати на зрошення дещо підвищені поливні норми, а в прохолодні і вологі періоди дещо їх зменшувати, тобто подавати їх за нижнім допустимим мінімумом. Отже, на фрагментарному розрахунковому гідрографі добових запасів ґрунтової вологи добре видно протягом всього періоду вегетаційних поливів режим зволоження різних шарів ґрунту, що дає можливість доцільно маневрувати, тобто управляти ним з врахуванням поточних погодних, технологічних і господарських можливостей. В той же час слід мати на увазі, що «плаваючі» поливні норми більш доцільні, особливо при ресурсозберігаючих режимах зволоження полів.

**Вправа 14.2 – Розрахунок режиму зрошення агрокультури агрогідрометеорологічним методом проф. О.Ф. Литовченка**

Дано: 1. Вихідні дані попередньої вправи.

Необхідно: 1. Розрахувати строки поливу кукурудзи в 2014 році.

2. Побудувати фрагментарний гідрограф ґрунтової вологи і режиму зволоження посівів кукурудзи.

Розв'язок:

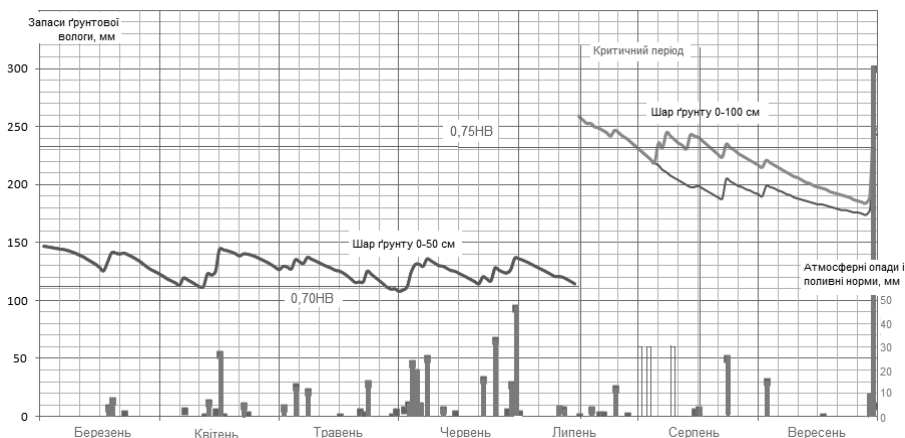
Режим зрошення за агрогідрометеорологічним методом встановлюють на підставі розрахунку ґрунтових запасів на кожен день вегетації. При зниженні запасів вологи нижче оптимального мінімуму призначають полив і далі розрахунок здійснюють з врахуванням цього поливу. Так проводять всі розрахунки протягом вегетації. Глибину активного кореневмісного шару і запаси в ньому призначають залежно від фаз розвитку агрокультури.



Для даної вправи прийнятий водозберігаючий режим зрошення, який передбачає три періоди вегетації:

- початковий – від посіву до критичного періоду (середини липня – 15.07) – глибина активного кореневмісного шару 0-50 см, нижня межа зволоження 0,70НВ (110 мм);
- критичний період – від початку викидання волоті до молочної стиглості (30 діб) – глибина кореневмісного шару – 0-100 см, нижня межа зволоження 0,80НВ;
- заключний період (після 15 серпня) – глибина активного шару ґрунту 0-100 см, нижня межа зволоження 0,70НВ, а в вересні 0,65НВ.

Звісно цей метод дає можливість задати і інші межі зволоження.



**Рисунок 14.2 – Фрагментарний гідрограф ґрунтової вологи і режим зволоження посівів кукурудзи за агрогідрометеорологічним методом (ГМС Синельникове, 2014 р.)**

Аналіз отриманого гідрографа показав, що в розрахунковому році необхідно здійснити 3 поливи (табл. 14.8).

**Таблиця 14.8 – Режим зрошення кукурудзи за 2014 р.**

№ поливу	Поливна норма, мм	Дата поливу
1	30	1.08
2	30	3.08
3	30	9.08

Зрошувальна норма – 90 мм (900 м<sup>3</sup>/га).

Здійснити такі поливи в реальних умовах господарства нереально, так як один полив займе декілька днів (5-8 діб), тому їх потрібно укомплектувати розпочинаючи дещо раніше, щоб встигнути здійснити поливи в установлені строки.

## 14.4. Розрахунок проєктного режиму зрошення під задану забезпеченість

Запропонована методика дає можливість розраховувати запаси ґрунтової вологи на кожен день вегетації агрокультури і встановити строки поливів із заданими поливними номадами. Маючи розрахунки за тривалий ретроспективний період строків поливів можна розрахувати режим зрошення під задану забезпеченість.

Для більшої наочності розрахунок проєктного режиму зрошення за розрахованими строками і нормами поливу наведений у вправі 14.3.

### **Вправа 14.3 – Розрахунок режиму зрошення кукурудзи за результатами ретроспективного розрахунку**

Дано: 1. Вихідні дані розрахунку режимів зношення агрогидрометеорологічним методом (табл. 14.9).

Необхідно: Встановити строки поливу для розрахункового року 75 %-ї забезпеченості

Розв'язок:

В табл. 14.9 наведені результати розрахунків строків поливу за багаторічний період для посівів кукурудзи при підтриманні рівня зволоженості 0,70НВ до критичного періоду в півметровому шарі, 0,75НВ в метровому шарі під час критичного періоду і 0,70НВ після критичного періоду, та припинення поливів у фазу воскової стиглості качанів кукурудзи.

**Таблиця 14.9 – Результати розрахунку строків поливу за багаторічний період (ГМС Синельникове, 1948-2014 рр.)**

Рік	Номер поливу												Зрошувальна норма, мм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1948	1.07	1.08											60
1949	1.06	2.06	10.07	07.08	13.08								150
1950	1.06	2.06	10.06	01.07	02.07	08.07	03.08	11.08					240
1951	1.06	1.07	02.07	09.07	01.08	09.08							180
1952	1.06	8.06	12.07	04.07	13.08								150
1953	3.07	10.07	1.08	8.08									120
1954	1.06	2.06	12.06	1.07	2.07	10.07	1.08	2.08	5.08	9.08	17.08		330
1955	1.07	7.07	14.07										90
1956	14.06	1.07											60
1957	9.06	1.07	2.07	4.07	10.07	5.08	12.08						210
1958	1.07	1.08	13.08										90
1959	1.06	9.06	1.07	9.07	14.07	1.08	7.08	13.08					240
1960	1.06	11.06	1.07	2.07	15.07	4.08	12.08						210
1961	1.07	7.07	1.08	5.08	11.08								150
1962	1.06	3.06	1.07	2.07	6.07	11.07	1.08	8.08	13.08				270
1963	1.06	9.06	3.07	10.07	1.08	2.08	7.08						210

Продовження таблиці 14.9

Рік	Номер поливу												Зрошувальна норма, мм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1964	8.07	6.08											60
1965	8.06	1.07	9.07	14.08									120
1966	6.07	14.07	1.08	8.08									120
1967	1.06	1.07	9.07	1.08	3.08	10.08							180
1968	1.06	2.06	8.06	1.07	2.07	6.07	12.07	5.08	10.08				270
1969	1.06	13.06	7.07	2.08	10.08								150
1970	1.07	4.07	11.07	1.08	7.08								150
1971	1.06	6.06	1.07	11.07	6.08	12.08							180
1972	1.06	8.06	14.06	1.07	4.07	1.08	2.08	6.08	11.08				270
1973	8.07	1.08											60
1974	13.06	1.08	8.08										90
1975	1.06	3.06	1.07	2.07	3.07	5.07	10.07	14.07	1.08	3.08	8.08	13.08	360
1976	3.07												30
1977	11.08												30
1978													0
1979	1.06	5.06	13.06	1.07	2.07	6.08	12.08						210
1980	11.07	1.08	12.08										90
1981	10.06	1.08	6.08	12.08									120
1982	10.06	13.08											60
1983	1.06	2.06	7.06	1.07	4.07	12.07	1.08	10.08					240
1984	1.07	4.07	1.08	7.08									120
1985	11.08												30
1986	1.06	9.06	1.07	4.07	13.07	4.08	11.08						210
1987	13.06	11.07	8.08										90
1988	1.07	10.08											60
1989	1.06	9.06	5.07	11.07	1.08	8.08							180
1990	4.06	1.07	10.07	1.08	5.08	10.08							180
1991	14.06	13.07	1.08	6.08	13.08								150
1992	4.07	1.08	6.08	13.08									120
1993	7.07	2.08											60
1994	1.07	6.07	13.07	1.08	6.08								150
1995	1.06	6.07	2.08	12.08									120
1996	11.06	1.07	2.07	6.07	6.07	13.07	1.08	12.08					240
1997	11.06												30
1998	5.06	1.07	3.07	1.08	5.09	12.08							180
1999	11.06	1.07	3.07	10.07	1.08	2.08	14.08						210
2000	1.06	13.06	12.07	3.08	10.08								150
2001	1.08	7.08	14.08										90
2002	1.06	2.06	1.07	7.07	11.07	3.08	13.08						210
2003	1.06	2.06	12.06										90
2004	2.08												30
2005	1.06	11.07	1.08	7.08									120
2006	4.07	12.07	8.08										90

*Продовження таблиці 14.9*

2007	1.06	2.06	9.06	1.07	6.07	12.07	1.08	2.08	7.08	12.08			300
2008	14.06	2.07	9.08										90
2009	9.06	1.07	7.07	13.07	1.08	7.08	14.08						210
2010	6.07	1.08	3.08	8.08									120
2011	1.06	5.06	1.08	6.08	12.08								150
2012	1.06	1.07	2.07	15.07	1.08	3.08	8.08	12.08					240
2013	1.06	4.06	7.07	12.07	1.08	5.08	11.08						210
2014	1.08	4.08	9.08										90

Аналіз табл. 14.9 показав, що зрошувальні норми для різних за зволоженістю років змінюється від 0 (1978 р.) до 360 мм (12 поливів, 1975 р.). Для подальших розрахунків з визначення забезпеченості статистичний ряд зрошувальних норм розташуємо у зростаючому порядку. Чим більше забезпеченість тим сухіше рік і потрібна більша поливна норма (табл. 14.10). Забезпеченість року розраховують за формулою (10.23).

*Таблиця 14.10 – Статистичний ряд зрошувальних норм розрахованих за багаторічний період (ГМС Синельниково, 1948-2014 рр.)*

№ з/п	Зрошувальна норма у зростаючому прядку		Забезпеченість, %
	норма, мм	рік	
1	0	1978	1,5
2	30	1976	2,9
3	30	1977	4,4
4	30	1985	5,9
5	30	1997	7,4
6	30	2004	8,8
7	60	1948	10,3
8	60	1956	11,8
9	60	1964	13,2
10	60	1973	14,7
11	60	1982	16,2
12	60	1988	17,6
13	60	1993	19,1
14	90	1955	20,6
15	90	1958	22,1
16	90	1974	23,5
17	90	1980	25,0
18	90	1987	26,5
19	90	2001	27,9
20	90	2003	29,4
21	90	2006	30,9
22	90	2008	32,4
23	90	2014	33,8
24	120	1953	35,3
25	120	1965	36,8

*Продовження таблиці 14.10*

№ з/п	Зрошувальна норма у зростаючому рядку		Забезпеченість, %
	норма, мм	рік	
26	120	1966	38,2
27	120	1981	39,7
28	120	1984	41,2
29	120	1992	42,6
30	120	1995	44,1
31	120	2005	45,6
32	120	2010	47,1
33	150	1949	48,5
34	150	1952	50,0
35	150	1961	51,5
36	150	1969	52,9
37	150	1970	54,4
38	150	1991	55,9
39	150	1994	57,4
40	150	2000	58,8
41	150	2011	60,3
42	180	1951	61,8
43	180	1967	63,2
44	180	1971	64,7
45	180	1989	66,2
46	180	1990	67,6
47	180	1998	69,1
48	210	1957	70,6
49	210	1960	72,1
50	210	1963	73,5
51	210	1979	75,0
52	210	1986	76,5
53	210	1999	77,9
54	210	2002	79,4
55	210	2009	80,9
56	210	2013	82,4
57	240	1950	83,8
58	240	1959	85,3
59	240	1983	86,8
60	240	1996	88,2
61	240	2012	89,7
62	270	1962	91,2
63	270	1968	92,6
64	270	1972	94,1
65	300	2007	95,6
66	330	1954	97,1
67	360	1975	98,5

Зрошувальна норма дискретно збільшується на 30 мм, і значення її для забезпеченості 75 % складає 210 мм (7 поливів). В цей діапазон потрапило 9 років (1957, 1960, 1963, 1979, 1986, 1999, 2002, 2009 і 2013 роки).

**Таблиця 14.11 – Дати поливу для років 75 % забезпеченості**

Рік	Номер поливу						
	1	2	3	4	5	6	7
1957	9.06	1.07	2.07	4.07	10.07	5.08	12.08
1960	1.06	11.06	1.07	2.07	15.07	4.08	12.08
1963	1.06	9.06	3.07	10.07	1.08	2.08	7.08
1979	1.06	5.06	13.06	1.07	2.07	6.08	12.08
1986	1.06	9.06	1.07	4.07	13.07	4.08	11.08
1999	11.06	1.07	3.07	10.07	1.08	2.08	14.08
2002	1.06	2.06	1.07	7.07	11.07	3.08	13.08
2009	9.06	1.07	7.07	13.07	1.08	7.08	14.08
2013	1.06	4.06	7.07	12.07	1.08	5.08	11.08
Середня дата	04.06	15.06	01.07	08.07	23.07	05.08	12.08

Отже, для проєктування зрошувальної мережі, насосної станції, режиму вододжерела, складання експлуатаційного сезонного графіка поливів, можна прийняти середні дати із табл. 14.11.

#### **Питання для самоконтролю**

1. В чому сутність розрахунку режиму зрошення сільськогосподарських культур агрогідрометеорологічним методом?
2. Що характеризує показник попередніх погодних умов?
3. Чому при врахуванні атмосферних опадів і поливних норм беруть різну їх вагу за часом випадіння?
4. Що показують емпіричні коефіцієнти  $a$ ,  $b$  і  $c$ ? Яким чином їх визначили?
5. Яка послідовність розрахунку запасів вологи в метровому і півметровому шарах ґрунту?
6. В яких шарах крім метрового і півметрового можна знайти запаси вологи за агрогідрометеорологічним методом?
7. Коли призначають поливи при розрахунках агрогідрометеорологічним методом?
8. Як визначають строки поливі сільськогосподарської культури для заданої забезпеченості за ретроспективним рядом спостережень?

## 15. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗРОШУВАЛЬНОЇ ВОДИ

Ефективність використання господарствами-водоспоживачами зрошувальної води характеризується коефіцієнтом водоспоживання (КВ). Величина його залежить не тільки від біологічних особливостей культури, але й від агротехніки, режиму зрошення, умов погоди.

Коефіцієнт водоспоживання включає як необхідні, так і непродуктивні витрати води. До непродуктивних належать втрати води внаслідок поганого планування поверхні поля, подачі надмірної кількості води при поливах, нерегульованого скиду та інших причин.

Непродуктивні втрати, пов'язані із зрошенням можуть бути виключені або в значній мірі зменшені при дотриманні правил техніки поливу. Низький рівень агротехніки також може викликати непродуктивні втрати води. Вони можуть бути наслідком забур'янення посівів, несвоечасного і неякісного обробітку ґрунту, зрідженості посівів і т. д.

Другий показник водоспоживання сільськогосподарських культур – коефіцієнт ефективності зрошення (КЕЗ). КЕЗ – це витрата зрошувальної води на одиницю збільшення врожаю від зрошення визначається за формулою

$$КЕЗ = \frac{M}{Y_3 - Y_6}, \quad (15.1)$$

де  $M$  – зрошувальна норма, м<sup>3</sup>/га;

$Y_3$  – урожай при зрошенні, ц/га;

$Y_6$  – урожай без зрошення, ц/га.

На КЕЗ більш позитивно впливають обробіток ґрунту і добрива. При більш високій передполивній вологості ґрунту витрата зрошувальної води на 1 т врожаю збільшується. Проте це збільшення залежить від умов живлення. Найбільше значення воно має на неудобреному фоні. При достатньому рівні живлення відмінності зникають, тобто підвищення норми добрив сприяють ефективному використанню великої кількості води.

Зміни КВ і КЕЗ у зв'язку з урожайністю сільськогосподарських культур пояснюються тим, що на водоспоживання і рівень урожайності діють одні й ті ж фактори. Наприклад, добрива сприяють підвищенню врожайності, вони ж сприяють зниженню витрат зрошувальної води на 1 т отриманої продукції. Зміни КВ і КЕЗ під впливом доб-

рив та інших умов технології вирощування закономірні, що дає можливість їх регулювати в достатньо широких межах.

### ***Питання для самоконтролю***

- 1. Які коефіцієнти застосовують для визначення ефективності використання зрошувальної води?*
- 2. Що показує коефіцієнт водоспоживання?*
- 3. Коли коефіцієнт водоспоживання є неефективним?*
- 4. Що означає КЕЗ? Чому він є кращим за коефіцієнт водоспоживання?*



## ВИСНОВОК

Загальна тенденція розвитку землеробства у світі на сучасному етапі передбачає створення умов для стабільного управління режимами ґрунтів: гідрологічним, термічним, біологічним та іншими шляхами.

Визначальна роль у вирішенні цього питання належить зрошенню та осушенню земель, завдяки широкому застосуванню яких істотно знижується залежність сільськогосподарського виробництва від умов природного вологозабезпечення, що в свою чергу дає можливість ряду країн успішно розв'язати проблему власного продовольчого забезпечення. До їх числа належить США, де системами іригації та дренажу охоплено близько 60 % сільськогосподарських земель, Голландії – 85 %, Німеччини – 60 %. Нині у світі понад 270 млн. га, що становить 18 % загальної площі ріллі, на яких виробляється 40 % обсягу сільськогосподарської продукції.

Одне із конкретних завдань зрошуваного землеробства – створити агрофони на яких, зрошення досягатиме найвищої ефективності. Можливості зрошуваного землеробства в цьому відношенні надзвичайно значні. Наприклад, при оптимізації ґрунтового живлення, приріст урожаю зерна кукурудзи від зрошення можливо збільшити в 2, а при особливо позитивному режиму зрошення – в 3 рази. При цьому відповідно витрати поливної води на одиницю отриманого урожаю в результаті зрошення зменшується також в 2-3 рази.

Із цього прикладу виникає і конкретне завдання – розробити таку агротехнологію, в тому числі і режими зрошення, що забезпечує найбільш економне використання поливної води, запаси якої в природі, особливо в Україні, мінімальні.

Для того, щоб як найповніше уявити завдання режиму зрошення потрібно врахувати, що подача води на поле для зрошення лише на половину вирішує проблему зростання врожаю, залишається ще і друга половина – використати ще і другий потенціал від зрошення, який може бути використаний лише за допомогою землеробських прийомів і методів.

Зрошуване землеробство створює необхідні умови для більш повного використання природних умов і землі, як засобу виробництва. При цьому відкривається можливість отримання двох – трьох урожаїв за один рік, та на полях, зайнятих однією культурою підвищується фізіологічно активна радіація (ФАР), як рушійна сила продукційного процесу.

В районах недостатнього зволоження України велике значення в створенні умов збільшенням урожайності сільськогосподарських культур належить воді. Вологозапаси крім безпосереднього використання рослинами, різностороннє впливають на найважливіші властивості ґрунту, поживний, повітряний та тепловий його режими. Регулювання водного режиму ґрунту за допомогою поливів дозволяє як найповніше використовувати кліматичні та ґрунтові ресурси, потенційні можливості сортів, добрив та інтенсивних технологій вирощування різних культур.

В період росту рослини споживають велику кількість води, з якої 0,01–0,03 % витрачається на утворення рослинних тканин, а інша частина – на транспірацію.

Метою зрошувальних меліорацій є створення та регулювання на полях водного режиму, який забезпечує отримання проектного врожаю сільськогосподарських культур. Водний режим знаходиться в прямій залежності від кліматичних, ґрунтових, гідрогеологічних та господарських умов, біологічних особливостей сільськогосподарської умови, її урожайності і від способу та техніки поливу.

Режим зрошення є одним з ключових елементів системи зрошуваного землеробства і технологій вирощування сільськогосподарських культур. Це комплексний показник, який складається з визначення й розподілу в часі кількості та норм поливів культур залежно від їхніх біологічних ознак, реакції на нестачу вологи на різних етапах органогенезу рослин, екологічного стану зрошуваних земель, якості поливної води, способів поливу, клімату зони і погодних умов вегетаційного періоду.

Режими зрошення окремих сільськогосподарських культур, згідно з розміщенням їх у сівозміні, становлять одну з важливих сторін системи зрошення. Вона характеризує загальну щорічну потребу господарства-водоспоживача у воді (по строках) для зрошення всієї сівозміни і має вигляд плану використання води в сівозміні, що показує розподіл її між культурами за фенологічними фазами їх розвитку. План дає можливість визначити поряд з потребою в поливній воді, загальну потребу в техніці і робочій силі для організації поливів. Потреба рослин у додатковому зволоженні залежить не тільки від їх біологічних особливостей, погоди, але й агротехніки, попередника, після якого їх розміщують, оскільки ґрунт після різних культур має неоднакову вологість і родючість.

Першочерговість поливу і ступінь забезпечення водою культур сівозміни визначають за їх господарським значенням, потребою в них даного господарства, вимогливістю до води окремих культур і економічним ефектом, одержаним від їх зрошення.

Сума всіх зрошувальних норм становить річну потребу господарства в поливній воді для зрошення. Треба враховувати, що найбільшої шкоди врожаю завдають перебої у поливах у критичні періоди розвитку сільськогосподарських культур.

З погляду економії води і водозбереження, а також з урахуванням місцевих умов і біологічних особливостей сільськогосподарських культур, необхідно оцінювати і вибирати способи поливу.

В навчальному посібнику розглянуто декілька підходів до формування режимів зрошення, а саме: біологічно оптимальний, оптимальний екологічно безпечний, водозберігаючий і ґрунтозахисний. Приділена увага етапам формування режиму зрошення: перспективне (річне планування), за якого визначають величини зрошувальної та поливних норм для різних сільськогосподарських культур для ефективної забезпеченості опадами, та оперативне управління поливами, що передбачає визначення поливних норм та строків проведення поливів залежно від фаз розвитку рослин, фактичних погодних умов вегетаційного періоду, властивостей ґрунтів та способу і техніки поливу.

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Атлас ресурсів ґрунтової вологи під посівами основних сільськогосподарських культур на території лісостепової і степової зон України / За ред. проф. Литовченка. Дніпропетровськ: ДДАУ, 2007. 68 с.
2. Алексеева А.О. Екологічна оцінка способів зрошення сільськогосподарських культур. Екологічні науки. 2020. № 1 (28). С. 130–134.
3. Балюк С.А. Бородіна Я.В., Самохвалова В.Л. та ін. Гармонізація національних стандартів з міжнародними у галузях ґрунтознавства та агрохімії // Вісн. аграр. науки. 2007. №2. С.17–21.
4. Балюк С.А. Наукові аспекти сталого розвитку зрошення земель в Україні. Пленарна доповідь на VII з'їзді ґрунтознавців та агрохіміків України 25 липня 2006 р. / С.А. Балюк, М.І. Ромащенко. Київ, 2006. 32 с.
5. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / Ромащенко М.І. та ін. Меліорація і водне господарство. 2020. № 1. С. 5–22.
6. Вожегова Р.А. Наукове обґрунтування режимів зрошення сільськогосподарських культур з врахуванням біологічних потреб рослин та технологічних параметрів зрошувальних систем / Р.А. Вожегова, Ю.О. Лавриненко, С.В. Коковіхін, П.В. Писаренко, І.М. Біляєва. // Зрошуване землеробство. Вип. 62. 2014. С. 36–39.
7. Вожегова Р.А. Наукове обґрунтування та практична реалізація режимів зрошення сільськогосподарських культур з врахуванням природних та господарсько-економічних чинників / Р.А. Вожегова, П.В. Писаренко, І.М. Біляєва та ін. Херсон: Грінв Д.С. 2015. 220 с.
8. Грушка І.Г. Методи і засоби вимірювання вологості матеріалів та середовища / І.Г. Грушка // Наук. праці УкрНДГМІ, 2005, Вип. 254, С.169–187. (електронний ресурс) [https://uhmi.org.ua/pub/np/254/13\\_Metod\\_Grushka.pdf](https://uhmi.org.ua/pub/np/254/13_Metod_Grushka.pdf).
9. Гун М. І. Діяльність Петра Івановича Броунова у Київському університеті // Наукові записки КДУ. 1953. Том 12. Вип. 2. Труды географічного факультету. № 2.
10. Доценко В.І. Використання розрахункових запасів ґрунтової вологи для оптимізації режиму зрошення кукурудзи в умовах Дніпропетровської області / В.І. Доценко // Вісник ДДАУ № 1–2. 1998. С. 78-82.
11. Доценко В.І. Зрошення сільськогосподарських культур самопливно-поверхневим способом: навчальний посібник / В.І. Доценко, В.В. Коваленко, Л.М. Рудаков, Т.І. Ткачук. Дніпро: ДДАЕУ, 2020. 198 с.
12. Доценко В.І. Зрошення сільськогосподарських культур способом дощування: навчальний посібник / В.І. Доценко, В.В. Морозов, Д.М. Онопрієнко. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2014. 448 с.

13. Доценко В.І. Оцінка якості води для поливів сільськогосподарських культур: навчальний посібник. / В.І Доценко, Д.М. Онопрієнко, В.Ю. Запорожченко, Т.І. Квачук. Дніпро: ДДАЕУ, Акцент ПП, 2023. 152 с.
14. Зрошення. Строки та норми поливу сільськогосподарських культур за краплинного зрошення. Методи визначення. ДСТУ 7887:2015. К.: ДПУкрНДНЦ, 2016. 18 с.
15. Ківер В.Х. Фертигація і гербігація в зрошуваному землеробстві України: монографія / В.Х. Ківер, Д.М. Онопрієнко. Херсон: Гринь Д.С. 2016. 148 с.
16. Ромащенко М.І. Концептуальні засади управління поливами при зрошенні / М.І. Ромащенко та ін., Меліорація і водне господарство. 2022. № 1. С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202201-328>
17. Литовченко О.Ф. Новий ресурсозберігаючий метод розрахунку режимів зрошення сільськогосподарських культур у степовій і лісостеповій зонах України / О.Ф. Литовченко. Таврійський науковий вісник. 2005. Вип. 41. С.83–93.
18. Литовченко А.Ф. Агрогидрометеорологический метод расчета влажности почвы и водосберегающих режимов увлажнения орошаемых культур в Степи и Лесостепи Украины: монография / А.Ф. Литовченко. Днепропетровск: Изд-во Свідлер А.Л., 2011. 244 с.
19. Меліоративні системи та споруди. ДБН В.2.4-1-99. К.: Держбуд України, 2000. 180 с.
20. Меліорація ґрунтів (систематика, перспективи, інновації): колективна монографія [за ред. С.А. Балюка, М.І. Ромащенко, Р.С. Трускавецького] / Херсон: Гринь Д.С., 2015. 668 с.
21. Методичні вказівки з визначення типового розподілу метеофакторів в характерні по умовах зволоження періоди вегетації для виконання водобалансових розрахунків та агрометеорологічних прогнозів. МТД 33-04-03-93. К.: Урожай. 1993. 37 с.
22. Методичні рекомендації з оперативного планування режимів зрошення. К.: Інститут гідротехніки і меліорації УААН, 2004. 49 с.
23. Наукові основи охорони та раціонального використання зрошуваних земель України. За наук. ред. С.А. Балюка, М.І. Ромащенко, В.А. Сташука. К.: Аграрна наука. 2009. 624 с.
24. Онопрієнко Д.М. Агроекологічні основи застосування фертигації в північному Степу України / Д.М. Онопрієнко // Екологія та ноосферологія: науковий журнал. Київ–Дніпропетровськ. 2011. Т.22. № 1–2. С.83–89.
25. Остапчик В.П. Посібник до ДБН В.2.4-1-99 «Меліоративні системи та споруди» / Водопотреба, режими зрошення сільськогосподарських культур та техніко-економічне обґрунтування водозабезпеченості меліоративних систем // В.П. Остапчик, Л.А. Філіпенко. К.: 2001. 54 с.
26. Пенман, Х.Л. Растение и влага / Х.Л. Пенман: [пер. с англ.]. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 161 с.

27. План заходів з реалізації Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 р. № 1567-р. URL: <http://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-z-realizaciyi-strategiyi-zroshennya-ta-drenazhu-s211020>
28. Резолюція 41/65 Генеральної Асамблеї ООН від 3.12.1986 «Принципи, що стосуються дистанційного зондування Землі з космічного простору» (електронний документ) [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_596#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_596#Text)
29. Реформа в управлінні зрошенням та дренажем – важливі аспекти сталого функціонування організацій водокористувачів / Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку Національної академії наук України» 12.02.2021 (електронний ресурс) <http://ecos.kiev.ua/news/view/1037>
30. Рокочинський А.М. Проектування закритих зрошувальних систем: навчальний посібник / А.М. Рокочинський, Ю.І. Гринь, В.І. Доценко, П.І. Мендусь, В.В. Коваленко, Л.М. Рудаков, А.В. Ткачук. Рівне: НУВГП; Дніпропетровськ: ДДАЕУ. 2015. 374 с.
31. Ромащенко М.І. Краплинне зрошення: Навчальний посібник / [М.І. Ромащенко, А.М. Рокочинський, В.М. Корюненко, А.Т. Каленікова, П.І. Мендусь, А.П. Шатковський, В.Г. Муранов, С.В. Рябков, С.П. Мендусь, С.Р. Стасюк] за редакцією академіка М.І. Ромащенка та професора А.М. Рокочинського. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 300 с.
32. Ромащенко М.І. Обґрунтування екологічно безпечних поливних норм / М.І. Ромащенко, О.І. Жовтоног, Л.А. Філіпенко // Вісник аграрної науки. 1999. № 11. С. 53-59.
33. Ромащенко М.І. Системи краплинного зрошення: Навчальний посібник / М.І. Ромащенко, В.І. Доценко, Д.М. Онопрієнко, О.І. Шевелєв // За ред. академіка М.І. Ромащенка. Дніпропетровськ: ДДАУ, 2007. 175 с.
34. Ромащенко М.І. Досвід розробки та шляхи удосконалення систем управління зрошенням / М.І. Ромащенко та ін. Меліорація і водне господарство. 2019. № 2. С. 17–30.
35. Ромащенко М.І., Режими і способи зрошення / М.І. Ромащенко та ін. Аграрна наука. 2009. С. 313–350.
36. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80#Text>
37. Гимчасові районовані норми водопотреби сільськогосподарських культур для зрошення дощуванням: Рекомендації. К.: Аграрна наука, 2015. 24 с.
38. Тюрк Л. Баланс почвенной влаги / Л. Тюрк; перев. с фр. под ред. Л.П. Струера. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 228 с.
39. Уряд дав старт залученню інвестицій у сферу зрошення та дренажу / Урядовий портал (електронний ресурс) <https://www.kmu.gov.ua/news/uryad-dav-start-zaluchennyu-investicij-u-sferu-zroshennya-ta-drenazhu>

40. Ушкаренко В.О. Зрошуване землеробство / В.О. Ушкаренко. К.: Урожай, 1994. 328 с.
41. Allen R.G. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report submitted to UN-FAO Water Resources Development and Management Service, Land and Water Dev. / R.G. Allen. Div., Rome, 1992. 50 p.
42. Allen R.G. Penman-Monteith evapotranspiration calculation: Reference ET and crop coefficients [online]. Colorado Evapotranspiration Workshop Marth 12, 2010. P.124.
43. Blaney H.F., Criddle W.D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data. Washington. US Soil Cons. Serv. SCS-TR-96. Pp. 48.
44. Jones H.J. Irrigation scheduling advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of Experimental Botany. 2004. № 55(407). P. 2427-2436.
45. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56 / Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith (електронний ресурс) <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
46. Campbell G.S., Campbell M.D., Hillel D. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. Advances in irrigation. 1982. № 1. P. 25–42.
47. Ma L. Root Zoone Water Quality Model (RZWQM2): Model Use, Calibration, and Validation. Ma L. et al. Transactions of the ASABE. 2012. № 55(4). P. 1425–1446.
48. Penman H.L. 1956. Evaporation. An introductory survey. Netherlands Journal of Agricultural Science. Vol. 4. Pp. 9-29.
49. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia / F. H. S. Chiew, N. N. Kamadalasa, H. M. Malano, T. A. McMahon // Agric. Water Management. 1995. Vol. 28. P. 9–21.
50. Rinaldi M., He Z. Decision Support System to Manage Irrigation in Agriculture. Advances in Agronomy. 2014. № 123. P. 229–279.
51. Romashenko M., Shatkowski A., Zhuravlev O. Features of application of the Penman-Monteith method for conditions of a drip irrigation of the steppe of Ukraine (on example of grain corn). Journal of Water and Land Development. 2016. No. 31 (X-XII): P. 123-127.
52. Sharma N., Hakkim F., Singh A.K. Development and field evaluation of a low-cost automated drip irrigation system. Journal of Soil and Water Conservation. 2021. № 20(2). H. 188–194.

## Додатки

Додаток А

**Глибина активного шару ґрунту та нижня допустима границя зволоженості за фенологічними фазами розвитку сільськогосподарських культур (ДБН В.2.4-1-99)**

Сільськогосподарська культура, фенологічна фаза розвитку	Глибина розрахункового шару ґрунту, см	Нижня допустима границя зволоження, % від НВ			
		гранулометричний склад ґрунту			
		супісок	легкий суглинок	середній суглинок	важкий суглинок
<b>Озимі зернові:</b>					
відновлення вегетації	60	65	70	70	75
трубкування – колосіння	80	65	70	75	80
квітування	80	65	70	70	75
молочна стиглість	80	60	65	70	75
<b>Ярі зернові:</b>					
посів-сходи	50	65	70	70	75
кущіння	60	65	70	75	80
трубкування-колосіння	80	65	70	70	80
квітування-налив зерна	80	65	70	70	80
молочна стиглість	80	60	65	70	75
<b>Кукурудза:</b>					
посів-сходи	50	65	70	70	75
5-7 листок	70	65	70	75	80
викидання волоті	80	65	70	75	80
молочна стиглість	80	60	65	70	75
<b>Цукровий буряк:</b>					
посів-сходи	50	65	70	70	75
3-4 дійсних листка	60	65	70	75	80
період посиленого росту листків	80	65	70	70	75
період наростання кореневого тіла	80	60	65	70	75
<b>Овочі:</b>					
висадка в ґрунт	40	65	70	70	75
утворення суцвіть	50	65	70	75	80
квітування	70	65	70	75	80
знімальна стиглість	80	60	65	70	75
<b>Картопля:</b>					
посадка	50	65	70	70	75
бутонізація-квітування	50	65	70	75	80
бульбоутворення	70	65	70	75	80
закінчення росту бадилля	70	60	65	70	75
<b>Люцерна 2-3 року:</b>					
відновлення вегетації	80	65	70	70	75
стеблування-бутонізація	100	65	70	75	80
квітування	100	65	65	70	75



Додаток Б – Орієнтовне середнє-одекадне водопоживання сільськогосподарських культур, % (чисельник)  
і глибина розрахункового кореневмісного шару ґрунту, м (знаменник)

Сільськогосподарська культура	Бер.			Квітень			Травень			Червень			Липень			Серпень			Вересень			Жовтень			Листопад			
	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Сівми зернові (пшениця, жито, ячмінь) на зерно	1,5	3,0	6,0	11	13	13	13	10	8,0	6,0	4,0	0,5							0,5	0,5	1,5	1,5	2,0	2,0	1,5	1,0	0,5	
Яри зернові (пшениця, ячмінь, овес) на зерно	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0								0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Кукурудза (просо, сорго) на зерно	0,2	0,2	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8																	
Кукурудза (просо, сорго) на зерно		4,5	5,0	5,5	6,0	7,0	7,5	7,5	8,5	9,0	9,0	8,5	8,0	7,5	5,5													
Горіх на зерно		0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0												
Горіх на зерно		0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6																		
Соя на зерно		3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	7,5	7,5	7,5	8,5	8,0	8,0	7,0	5,5	4,5	4,0	3,5										
Буряки кормові		0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Буряки цукрові	0,5	1,0	1,5	2,5	3,0	3,5	4,0	5,5	6,0	7,5	8,5	8,5	8,5	9,5	10	11	7,0	4,5	3,0									
Буряки цукрові	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
Соняшник		4,5	5,0	5,5	6,0	7,0	7,5	8,5	9,5	10	11	10	9,0	6,5														
Соняшник		0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0														
Льодерна 1-го року (весняний посів)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,5	6,0	7,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	3,5	3,0	1,5	1,0	0,5				
Льодерна 1-го року (літній посів)	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
Льодерна 2-3 року																												
Льодерна 2-3 року	0,5	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,5	7,5	8,0	8,0	8,0	7,5	6,5	5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5				
Кукурудза на силос і зеленій корм (судан-сека трава)	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Кукурудза на силос і зеленій корм (судан-сека трава)		0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7										
Однорічні трави та ін. культури на зеленій корм, в т. ч. багатоконцентні суміші	0,5	1,0	1,5	6,0	8,0	9,5	11	12	12	12	12	12	12	12	9,5	5,0												
Однорічні трави та ін. культури на зеленій корм, в т. ч. багатоконцентні суміші	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6												
Сівми на зеленій корм (жито, пшениця, суміші)	15	25	18																									
Сівми на зеленій корм (жито, пшениця, суміші)	0,6	0,6	0,6																									
Поживна кукурудза на силос та зеленій корм																												
Поживна кукурудза на силос та зеленій корм																												
Просо поживне																												
Просо поживне																												
Поживні однорічні суміші																												
Поживні однорічні суміші																												
Картопля весняної посадки (рання)																												
Картопля весняної посадки (рання)		6,0	8,0	12	16	18	20	16	4,0																			
Картопля весняної посадки (рання)		0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

Продовження додатку Б – Орієнтовне середнь-оцікне водоспоживання сільськогосподарських культур, % (чисельник)  
і глибина розрачуноквого кореневмісного шару ґрунту, м (знаменник)

Сільськогосподарська культура	Бер.			Квітень			Травень			Червень			Липень			Серпень			Вересень			Жовтень			Листопад		
	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Картопля літньої посадки											5,0	5,5	6,0	5,5	7,0	9,5	12	12	11	9,5	8,0	4,0					
Капуста рання розсадна	0,5	2,0	4,0	6,0	8,0	10	14	14	16	16	16	9,0	0,5														
Капуста пізня безрозсадна	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7															
Капуста пізня розсадна																											
Помідори, перець, баклажани розсади																											
Помідори, перець, баклажани безрозсади	2,0	3,0	5,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	
Огірки ранні																											
Огірки пізні																											
Буряки столові	1,0	1,5	2,5	3,0	3,5	4,5	5,0	5,5	6,0	7,5	7,5	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	
Морква весняного посіву	0,5	1,0	1,5	6,0	8,0	10	11	12	12	12	11	10	3,0	2,0													
Морква літнього посіву	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Кабачки, патисони																											
Цибуля ріпчаста																											
Баштан гормозий																											
Сад молодий	0,5	1,0	1,5	2,0	4,0	5,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5		
Сад плодоносний	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
Виноград	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	

**Поправочний коефіцієнт для приведення температури повітря  
до 12-годинної тривалості дня**

Місяць	Декада	Широта, °									
		41	43	45	47	49	51	53	55	57	59
Березень	1	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91
	2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	3	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06
Квітень	1	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,13
	2	1,10	1,12	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,21
	3	1,14	1,15	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22	1,24	1,25	1,28
Травень	1	1,18	1,19	1,20	1,22	1,24	1,26	1,27	1,29	1,32	1,34
	2	1,20	1,21	1,24	1,25	1,27	1,30	1,32	1,35	1,37	1,41
	3	1,23	1,24	1,26	1,29	1,31	1,33	1,36	1,38	1,42	1,46
Червень	1	1,24	1,26	1,29	1,31	1,33	1,36	1,39	1,41	1,46	1,51
	2	1,26	1,27	1,30	1,32	1,35	1,37	1,41	1,44	1,48	1,53
	3	1,26	1,28	1,30	1,32	1,35	1,38	1,41	1,45	1,49	1,54
Липень	1	1,25	1,27	1,29	1,31	1,34	1,37	1,39	1,43	1,47	1,51
	2	1,24	1,26	1,27	1,29	1,32	1,34	1,37	1,40	1,44	1,49
	3	1,21	1,23	1,25	1,27	1,31	1,29	1,34	1,35	1,40	1,43
Серпень	1	1,19	1,20	1,22	1,23	1,25	1,27	1,29	1,31	1,35	1,37
	2	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,22	1,24	1,26	1,28	1,31
	3	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,20	1,22	1,24
Вересень	1	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17
	2	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09
	3	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
Жовтень	1	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95
	2	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
	3	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	1,81

**Значення коефіцієнтів біологічної кривої  $k_6$  залежно від виду сільськогосподарської культури та сум приведених середньодобових температур повітря  $\sum t_{np}$  (зернові та зернобобові культури)**

$\sum t_{np}, ^\circ\text{C}$	Пшениця озима	Пшениця яра	Овес	Ячмінь ярий	Кукурудза на зерно	Сорго	Просо	Горох	Зернобобові
100	0,53	0,27	0,25	0,27	0,23	0,23	0,22	0,30	0,28
200	0,53	0,30	0,25	0,30	0,25	0,25	0,27	0,31	0,28
300	0,53	0,32	0,26	0,32	0,28	0,28	0,30	0,32	0,29
400	0,53	0,35	0,28	0,35	0,29	0,29	0,32	0,33	0,30
500	0,53	0,37	0,33	0,37	0,31	0,31	0,36	0,34	0,32
600	0,52	0,40	0,37	0,40	0,34	0,34	0,38	0,36	0,34
700	0,51	0,43	0,41	0,43	0,37	0,37	0,40	0,38	0,36
800	0,50	0,45	0,49	0,44	0,39	0,39	0,42	0,40	0,38
900	0,49	0,47	0,50	0,47	0,41	0,41	0,42	0,41	0,38
1000	0,46	0,45	0,52	0,45	0,43	0,43	0,40	0,40	0,39
1100	0,44	0,43	0,52	0,43	0,45	0,46	0,38	0,38	0,39
1200	0,42	0,40	0,52	0,40	0,47	0,46	0,35	0,36	0,39
1300	0,41	0,37	0,52	0,37	0,49	0,49	0,34	0,32	0,39
1400	0,36	0,32	0,52	0,32	0,47	0,47	0,30	0,30	0,39
1500	0,31	0,27	0,50	0,27	0,45	0,45	0,26	0,28	0,38
1600	0,27	0,27	0,49	0,27	0,42	0,42	0,24	0,26	0,38

## Продовження додатку Г

**Значення коефіцієнтів біологічної кривої  $k_6$  залежно від виду сільськогосподарської культури та сум приведених середньодобових температур повітря  $\sum t_{np}$  (технічні культури)**

$\sum t_{np}$	Соняшник	Соя	Рапс ранній	Цукровий буряк	Тютюн
100	0,23	0,23	0,24	0,23	0,24
200	0,25	0,25	0,21	0,25	0,21
300	0,28	0,28	0,17	0,29	0,17
400	0,29	0,29	0,18	0,30	0,18
500	0,31	0,31	0,18	0,31	0,18
600	0,34	0,34	0,19	0,33	0,19
700	0,37	0,34	0,21	0,35	0,21
800	0,39	0,39	0,22	0,36	0,22
900	0,41	0,41	0,21	0,37	0,21
1000	0,43	0,43	0,17	0,38	0,17
1100	0,46	0,46	0,18	0,40	0,18
1200	0,47	0,47	0,18	0,41	0,18
1300	0,49	0,49	0,21	0,43	0,19
1400	0,47	0,47	0,21	0,44	0,21
1500	0,45	0,45	0,21	0,46	0,21
1600	0,42	0,42	0,17	0,47	0,21
1700	0,38	0,38	0,17	0,49	0,17
1800	0,34	0,34	0,21	0,49	0,17
1900	0,30	0,30	0,21	0,49	0,21
2000	0,28	0,28	0,17	0,49	0,21

$\sum t_{np}$	Соняшник	Соя	Рапс ранній	Цукровий буряк	Тютюн
2100	0,25	0,25	0,18	0,47	0,17
2200	0,23	0,21	0,18	0,46	0,18
2300	0,21	0,21	0,19	0,44	0,18
2400	0,21		0,20	0,43	0,19
2500			0,20	0,42	0,20
2600			0,21	0,40	0,20
2700			0,21	0,39	0,21
2800			0,17	0,37	0,21
2900			0,18	0,36	0,17
3000			0,20	0,35	0,18
3100			0,21	0,33	0,20
3200			0,21	0,32	0,21
3300			0,17		0,21
3400			0,18		0,17
3500			0,20		0,18

Продовження додатку Г

Значення коефіцієнтів біологічної кривої  $k_B$  залежно від виду сільськогосподарської культури та сум приведених середньодобових температур повітря  $\sum t_{np}$  (овочеві та баштанні культури)

$\sum t_{np}$	Карто- пля	Огірок, кабачок	Цибуля	Капуста		Помідор, перець	Морква	Буряк столовий	Баш- танні
				рання	пізня				
100	0,23	0,27	0,26	0,31	0,31	0,28	0,30	0,27	0,50
200	0,29	0,28	0,26	0,31	0,31	0,32	0,31	0,28	0,52
300	0,36	0,30	0,27	0,32	0,31	0,38	0,32	0,30	0,42
400	0,38	0,32	0,28	0,32	0,31	0,42	0,32	0,30	0,44
500	0,41	0,33	0,29	0,33	0,32	0,46	0,33	0,30	0,46
600	0,43	0,34	0,30	0,33	0,32	0,52	0,33	0,30	0,48
700	0,46	0,35	0,31	0,34	0,33	0,56	0,34	0,31	0,52
800	0,46	0,37	0,31	0,35	0,34	0,56	0,34	0,32	0,54
900	0,46	0,38	0,32	0,37	0,35	0,56	0,35	0,32	0,52
1000	0,43	0,40	0,32	0,40	0,36	0,53	0,35	0,31	0,42
1100	0,41	0,42	0,33	0,42	0,37	0,50	0,36	0,30	0,44
1200	0,38	0,42	0,34	0,43	0,39	0,46	0,36	0,29	0,46
1300	0,35	0,42	0,35	0,44	0,40	0,43	0,37	0,29	0,52
1400	0,32	0,40	0,34	0,44	0,42	0,41	0,37	0,30	0,53
1500	0,29	0,38	0,34	0,44	0,44	0,40	0,37	0,31	0,53
1600	0,27	0,36	0,34	0,44	0,44	0,39	0,38	0,31	0,42
1700	0,25	0,35	0,33	0,44	0,44	0,38	0,39	0,32	0,43
1800	0,25	0,34	0,33	0,44	0,44	0,38	0,40	0,32	0,52
1900	0,25	0,33	0,32		0,44	0,37	0,41	0,32	0,52
2000	0,25	0,32	0,32		0,44	0,37	0,42	0,32	0,42
2100	0,23	0,31	0,31		0,44	0,36	0,41	0,32	0,44
2200		0,38	0,31		0,44	0,36	0,40	0,32	0,46
2300		0,26	0,30		0,43	0,36	0,39	0,32	0,48
2400			0,30		0,43	0,36	0,38	0,32	0,49
2500			0,30		0,42	0,36	0,36	0,31	0,51
2600			0,30		0,42	0,36	0,34	0,50	0,52

$\sum t_{np}$	Карто- пля	Огірок, кабачок	Цибуля	Капуста		Помідор, перець	Морква	Буряк столовий	Баш- танні
				рання	пізня				
2700			0,30		0,41	0,36	0,33	0,29 0,27	0,52
2800			0,30		0,40	0,36	0,32	0,26	0,42
2900			0,30		0,40	0,36	0,31	0,25	0,46
3000					0,40	0,36	0,30	0,24	0,49
3100						0,36	0,30	0,23	0,52
3200						0,36	0,30		0,52
3300						0,36			0,42
3400						0,36			0,46
3500						0,36			0,49

Продовження додатку Г

**Значення коефіцієнтів біологічної кривої  $k_G$  залежно від виду сільськогосподарської культури та сум приведених середньодобових температур повітря  $\sum t_{np}$  (кормові культури)**

$\sum t_{np}$	Люцерна 1 року	Люцерна 2-3 року	Кукурудза на силос	Кормовий буряк	Пожнивні кукурудза	Пасовища
100	0,50	0,60	0,23	0,23	0,23	0,24
200	0,50	0,52	0,25	0,25	0,25	0,21
300	0,51	0,42	0,28	0,29	0,25	0,17
400	0,52	0,44	0,29	0,30	0,30	0,18
500	0,50	0,46	0,31	0,31	0,31	0,18
600	0,48	0,48	0,34	0,33	0,35	0,19
700	0,44	0,52	0,37	0,35	0,37	0,21
800	0,40	0,54	0,39	0,36	0,39	0,22
900	0,42	0,52	0,41	0,37	0,41	0,21
1000	0,45	0,42	0,43	0,38	0,43	0,17
1100	0,45	0,44	0,46	0,40	0,46	0,18
1200	0,47	0,46	0,47	0,41	0,47	0,18
1300	0,50	0,52	0,49	0,43	0,49	0,18
1400	0,52	0,53	0,47	0,44	0,48	0,21
1500	0,47	0,53	0,45	0,46	0,45	0,21
1600	0,45	0,42	0,42	0,47	0,41	0,21
1700	0,45	0,43	0,38	0,49	0,38	0,21
1800	0,46	0,45	0,34	0,49	0,30	0,17
1900	0,47	0,47	0,30	0,49		0,17
2000	0,50	0,49	0,28	0,47		0,21
2100	0,52	0,51	0,25	0,46		0,21
2200	0,47	0,52	0,23	0,44		0,17
2300	0,45	0,52	0,21	0,43		0,18
2400	0,45	0,42	0,21	0,42		0,18
2500	0,46	0,44		0,40		0,19
2600	0,47	0,46		0,39		0,20
2700	0,50	0,48		0,37		0,20
2800	0,52	0,49		0,36		0,21
2900	0,47	0,51		0,35		0,21
3000	0,45	0,52		0,33		0,17

3100	0,45	0,52		0,32		0,18
3200	0,52	0,42				0,20
3300	0,42	0,46				0,21
3400	0,46	0,49				0,21
3500	0,49	0,52				0,17
3600		0,52				0,18
3700		0,42				0,20
3800		0,46				
3900		0,49				

Коефіцієнти  $k_g$  для люцерни запропоновані УкрНДІЗЗ для умов 5 укосів

Продовження додатку Г

**Значення коефіцієнтів біологічної кривої  $k_g$  залежно від виду сільськогосподарської культури та сум приведених середньодобових температур повітря  $\sum t_{np}$  (сумісні та поживні посіви)**

$\sum t_{np}$	Ярові зернові + люцерна (під покрив)	Озима пшениця + літній посів трав	Озима пшениця + поживна кукурудза
100	0,27	0,24	0,53
200	0,30	0,21	0,53
300	0,32	0,17	0,53
400	0,35	0,18	0,53
500	0,37	0,18	0,53
600	0,40	0,19	0,52
700	0,43	0,21	0,51
800	0,45	0,22	0,50
900	0,47	0,21	0,49
1000	0,45	0,17	0,46
1100	0,43	0,18	0,44
1200	0,40	0,18	0,42
1300	0,37	0,21	0,41
1400	0,32	0,21	0,36
1500	0,27	0,21	0,31
1600	0,27	0,17	0,27
1700	0,27	0,17	0,23
1800	0,27	0,21	0,21
1900		0,21	0,20
2000		0,17	0,19
2100		0,18	0,19
2200		0,18	
2300		0,19	
2400		0,20	
2500		0,20	
2600		0,21	
2700		0,21	
2800		0,17	
2900		0,18	
3000		0,20	
3100		0,21	
3200		0,21	

$\sum t_{np}$	Ярові зернові + люцерна (під покрив)	Озима пшениця + літній посів трав	Озима пшениця + поживна кукурудза
3300		0,17	
3400		0,18	
3500		0,20	

Продовження додатку Г

Значення коефіцієнтів біологічної кривої  $k_6$  залежно від виду сільськогосподарської культури та сум приведених середньодобових температур повітря  $\sum t_{np}$  (сади та виноградники)

$\sum t_{np}$	Сад сім'ячковий	Сад кісточковий	Ягідник	Виноградник
100	0,20	0,20	0,20	0,05
200	0,21	0,21	0,21	0,06
300	0,21	0,21	0,21	0,06
400	0,21	0,21	0,21	0,06
500	0,21	0,21	0,21	0,07
600	0,41	0,40	0,41	0,08
700	0,41	0,40	0,41	0,09
800	0,41	0,40	0,41	0,10
900	0,41	0,40	0,41	0,11
1000	0,41	0,40	0,41	0,12
1100	0,47	0,51	0,47	0,15
1200	0,47	0,51	0,47	0,19
1300	0,47	0,51	0,47	0,22
1400	0,47	0,51	0,47	0,27
1500	0,47	0,51	0,47	0,30
1600	0,47	0,51	0,47	0,32
1700	0,47	0,51	0,47	0,36
1800	0,45	0,62	0,45	0,42
1900	0,45	0,62	0,45	0,41
2000	0,45	0,62	0,45	0,42
2100	0,45	0,62	0,45	0,42
2200	0,45	0,62	0,45	0,43
2300	0,45	0,62	0,45	0,42
2400	0,45	0,62	0,45	0,42
2500	0,40	0,58	0,40	0,41
2600	0,40	0,58	0,40	0,40
2700	0,40	0,58	0,40	0,38
2800	0,40	0,58	0,40	0,35
2900	0,40	0,58	0,40	0,30
3000	0,40	0,58	0,40	0,26
3100	0,40	0,58	0,40	0,22
3200	0,33	0,46	0,33	0,10
3300	0,33	0,46	0,33	0,10
3400	0,33	0,46	0,33	0,10
3500	0,33	0,46	0,33	0,10
3600	0,33	0,46	0,33	0,10



**Додаток Д**  
**Агрометеорологічні параметри сільськогосподарських культур**  
**для розрахунку режимів зрощення удосконаленим біокліматичним**  
**методом В.П. Остапчика**

Сільськогосподарська культура, та її фенологічна фаза розвитку	Сума температур повітря $\sum t, ^\circ\text{C}$	Ступінь покриття поверхні	Біологічний коефіцієнт $k_b$	Глибина активного шару, $h, \text{м}$
1	2	3	4	5
<b>ПШЕНИЦЯ ОЗИМА</b>				
2. Відновлення вегетації	0	0,49	0,98	0,50
3. Куціння	25	0,70	0,98	0,60
4. Початок трубкування	195	1,00	1,13	0,90
5. Колосіння	680	1,00	1,15	0,90
6. Квітування	900	1,00	1,05	0,90
7. Молочна стиглість	1030	1,00	0,96	0,90
8. Воскова стиглість	1300	1,00	0,74	0,90
9. Збирання врожаю	1400	1,00	0,67	0,90
<b>ЖИТО ОЗИМЕ</b>				
2. Відновлення вегетації	0	0,49	0,90	0,50
3. Куціння	25	0,70	0,98	0,60
4. Початок трубкування	240	1,00	1,13	0,90
5. Колосіння	500	1,00	1,15	0,90
6. Квітування	680	1,00	1,05	0,90
7. Молочна стиглість	990	1,00	0,96	0,90
8. Воскова стиглість	1230	1,00	0,74	0,90
9. Збирання врожаю	1375	1,00	0,68	0,90
<b>ПШЕНИЦЯ ЯРА</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	160	0,07	0,90	0,50
4. Куціння	280	0,65	1,02	0,60
5. Початок трубкування	460	1,00	1,10	0,60
6. Колосіння	990	1,00	0,99	0,70
7. Квітування	1100	1,00	0,85	0,80
8. Молочна стиглість	1300	1,00	0,73	0,80
9. Збирання	1530	1,00	0,67	0,80
<b>ЯЧМІНЬ ЯРИЙ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	130	0,07	0,90	0,50
4. Куціння	400	0,65	1,02	0,60
5. Початок трубкування	560	1,00	1,10	0,60
6. Колосіння	620	1,00	0,99	0,70
7. Квітування	1000	1,00	0,85	0,80
8. Молочна стиглість	1185	1,00	0,73	0,80
9. Збирання	1320	1,00	0,67	0,80
<b>ГРЕЧКА</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,60	0,40
3. Сходи	190	0,07	0,61	0,40
4. Квітування	700	1,00	1,10	0,60
9. Збирання врожаю	1550	1,00	0,48	0,60

## Продовження додатку Д

Сільськогосподарська культура, та її фенологічна фаза розвитку	Сума температур повітря $\sum t, ^\circ\text{C}$	Ступінь покриття поверхні $\varphi$	Біологічний коефіцієнт $k_b$	Глибина активного шару, $h$ , м
<b>ОВЕС</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	150	0,07	0,90	0,50
4. Кущіння	420	0,65	1,02	0,60
5. Трубкування	560	1,00	1,10	0,60
6. Викидання волоті	990	1,00	0,99	0,70
7. Квітування	1070	1,00	0,85	0,80
8. Молочна стиглість	1180	1,00	0,73	0,80
9. Збирання врожаю	1500	1,00	0,67	0,80
<b>ГОРОХ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	175	0,60	0,90	0,50
4. Початок квітування	680	0,80	1,00	0,50
5. Квітування	750	0,80	1,10	0,60
6. Кінець квітування	1000	0,80	1,15	0,60
7. Утворення бобів	1150	0,80	1,00	0,60
8. Початок дозрівання	1300	0,70	0,90	0,60
9. Збирання	1600	0,40	0,80	0,60
<b>ПРОСО</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	220	0,07	0,90	0,50
4. Кущіння	500	0,48	1,08	0,60
5. Вихід в трубку	700	0,70	1,08	0,70
6. Викидання волоті	1000	1,00	0,96	0,80
9. Збирання	1700	1,00	0,50	0,80
<b>СОРГО</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	220	0,07	0,90	0,50
4. Кущіння	600	0,48	1,08	0,60
5. Вихід в трубку	800	0,70	1,08	0,70
6. Викидання волоті	1600	1,00	0,96	0,80
9. Збирання	2660	1,00	0,50	0,80
<b>СОЯ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	200	0,07	0,90	0,50
4. Утворення пагонів	1000	0,70	0,96	0,60
5. Початок квітування	1450	1,00	1,05	0,70
6. Кінець квітування	1700	1,00	1,05	0,80
7. Утворення бобів	1850	1,00	1,05	0,80
8. Дозрівання	2530	1,00	0,55	0,80
9. Збирання	2890	1,00	0,55	0,80

## Продовження додатку Д

Сільськогосподарська культура, та її фенологічна фаза розвитку	Сума температур повітря $\sum t, ^\circ\text{C}$	Ступінь покриття поверхні $\varphi$	Біологічний коефіцієнт $k_\phi$	Глибина активного шару, $h, \text{м}$
<b>КУКУРУДЗА НА ЗЕРНО</b> (середньостиглі гібриди)				
2. Сівба	0	0,00	0,60	0,40
3. Сходи	215	0,14	0,90	0,50
4. 4-й листок	565	0,53	0,90	0,50
5. 8-й листок	830	0,75	0,98	0,60
6. Викидання волоті	1300	1,00	1,15	0,90
7. Квітування	1400	1,00	1,02	0,90
8. Молочна стиглість	2050	1,00	0,89	1,00
9. Збирання	2600	1,00	0,65	1,00
<b>БУРЯК ЦУКРОВИЙ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,76	0,40
3. Сходи	160	0,12	0,85	0,40
4. 4-й листок	465	0,30	0,92	0,50
5. 8-й листок	725	0,52	1,04	0,60
6. Змикання листя	1280	1,00	1,13	0,90
7. Закриття міжрядь	1700	1,00	1,18	1,00
8. Жовтіння листя	2400	1,00	1,01	1,00
9. Збирання	2900	1,00	0,69	1,00
<b>БУРЯК КОРМОВИЙ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,76	0,40
3. Сходи	160	0,12	0,85	0,40
4. 4-й листок	465	0,30	0,92	0,50
5. 8-й листок	725	0,52	1,04	0,60
6. Змикання листя	1380	1,00	1,13	0,90
7. Закриття міжрядь	1700	1,00	1,18	1,00
8. Жовтіння листя	2200	1,00	1,04	1,00
9. Збирання	3100	1,00	0,69	1,00
<b>БУРЯК СТОЛОВИЙ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	160	0,07	0,90	0,40
4. 4-й листок	465	0,30	1,00	0,50
5. 8-й листок	725	0,50	1,10	0,70
6. Змикання листя	1175	1,00	1,05	0,70
7. Закриття міжрядь	1775	1,00	1,00	0,70
8. Жовтіння листя	2550	1,00	0,90	0,70
9. Збирання	2700	1,00	0,90	0,70
<b>СОНЯШНИК</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	225	0,10	0,90	0,50
4. 2-га пара листків	395	0,52	0,95	0,60
5. Утворення суцвіть	955	1,00	1,15	0,90
6. Квітування	1465	1,00	0,94	0,90
9. Збирання	250	1,00	0,60	0,90

Продовження додатку Д

Сільськогосподарська культура, та її фенологічна фаза розвитку	Сума температур повітря $\sum t, ^\circ\text{C}$	Ступінь покриття поверхні $\phi$	Біологічний коефіцієнт $k_b$	Глибина активного шару, $h$ , м
<b>ЛЮЦЕРНА НА СИНО</b>				
2. Відновлення вегетації	0	0,50	0,85	1,00
3. 1-й укіс	650	0,60	0,85	1,00
4. Відростання	875	1,00	0,90	1,00
5. 2-й укіс	1550	0,60	0,85	1,00
6. Відростання	1800	1,00	1,00	1,00
7. 3-й укіс	2500	0,60	0,85	1,00
8. Відростання	2700	1,00	1,00	1,00
9. Збирання	3300	1,00	1,00	1,00
<b>ЛЮЦЕРНА НА НАСІННЯ</b>				
2. Відновлення вегетації	0	0,00	0,80	0,90
3. Кушіння	120	0,17	0,82	0,90
4. Стеблювання	370	0,50	0,85	0,90
5. Бутонізація	600	0,70	0,90	0,90
6. Квітування	800	1,00	0,95	0,90
7. Налив зерна	1100	1,00	0,90	0,90
8. Дозрівання насіння	1350	1,00	0,85	1,00
9. Збирання врожаю	1800	1,00	0,80	1,00
<b>КУКУРУДЗА НА СИЛОС</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,90	0,40
3. Сходи	225	0,53	0,90	0,50
4. 4-й листок	675	0,75	0,90	0,60
5. 8-й листок	1015	1,00	0,98	0,90
6. Викидання волоті	1275	1,00	1,15	0,90
7. Квітування	1550	1,00	1,02	1,00
8. Молочна стиглість	1800	1,00	0,87	1,00
9. Збирання врожаю	200	1,00	0,87	1,00
<b>ПОЖНИВНА КУКУРУДЗА НА ЗЕЛЕНИЙ КОРМ</b>				
1. Оранка	0	0,00	0,00	0,30
2. Сівба	50	0,00	0,90	0,40
3. Сходи	240	0,14	0,90	0,50
4. 4-й листок	600	0,53	0,90	0,60
5. 8-й листок	850	0,75	0,98	0,90
6. Викидання волоті	1275	1,00	1,15	0,90
7. Квітування	1550	1,00	1,02	1,00
8. Молочна стиглість	1700	1,00	0,87	1,00
9. Збирання врожаю	1800	1,00	0,87	1,00
<b>КАВУН</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,60	0,40
3. Сходи	325	0,17	0,90	0,50
4. Квітування	1200	0,50	1,05	0,60
5. Перший збір врожаю	2000	0,70	0,85	0,70
6. Останній збір врожаю	2700	0,70	0,60	0,70

Продовження додатку Д

Сільськогосподарська культура, та її фенологічна фаза розвитку	Сума температур повітря $\sum t, ^\circ\text{C}$	Ступінь покриття поверхні $\varphi$	Біологічний коефіцієнт $k_b$	Глибина активного шару, $h$ , м
<b>ДИНЯ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,60	0,40
3. Сходи	300	0,17	0,90	0,50
4. Квітування	1000	0,50	1,05	0,60
5. Знімальна стиглість	2000	0,70	0,85	0,70
6. Збирання врожаю	2500	0,70	0,60	0,70
<b>ОГІРОК</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	195	0,07	0,90	0,40
4. Початок квітування	930	0,60	0,90	0,50
5. Кінець квітування	1200	1,00	1,05	0,50
6. Початок збирання	1360	1,00	1,00	0,60
7. Кінець збирання огірка	2100	1,00	0,87	0,60
<b>КАБАЧОК</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,83	0,40
3. Сходи	220	0,17	0,90	0,40
4. Квітування	950	0,50	1,05	0,50
5. Знімальна стиглість	1360	0,70	1,00	0,60
6. Збирання врожаю	2000	0,70	0,87	0,60
<b>МОРКВА СТОЛОВА</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	220	0,07	0,90	0,50
4. Початок стиглості	1000	0,30	1,05	0,60
5. Технічна стиглість	1650	0,80	0,90	0,60
9. Збирання врожаю	2525	1,00	0,85	0,70
<b>ЦИБУЛЯ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	180	0,07	0,95	0,40
4. 5-й листок	500	0,45	0,95	0,50
5. Полягання цибулиння	2025	0,50	0,85	0,60
6. Жовтіння цибулиння	2450	0,50	0,82	0,60
7. Збирання врожаю	2600	0,48	0,82	0,60
<b>ПОМІДОР БЕЗРОЗСАДНИЙ</b>				
2. Сівба	0	0,00	0,00	0,40
3. Сходи	250	0,07	0,90	0,40
4. Початок квітування	750	0,37	1,00	0,50
5. Кінець квітування	1250	0,60	1,03	0,60
6. Початок дозрівання	1550	0,60	1,05	0,60
7. Початок збирання помідор	1750	0,60	0,80	0,70
8. Кінець збирання врожаю	2900	0,60	0,60	0,70

**Продовження додатку Д**

Сільськогосподарська культура, та її фенологічна фаза розвитку	Сума температур повітря $\sum t, ^\circ\text{C}$	Ступінь покриття поверхні $\varphi$	Біологічний коефіцієнт $k_b$	Глибина активного шару, $h$ , м
<b>ПОМІДОР РОЗСАДНИЙ</b>				
2. Посадка	0	0,05	0,90	0,40
3. Початок квітання	320	0,60	1,03	0,50
4. Кінець квітання	1000	0,75	1,05	0,60
5. Початок дозрівання	1200	0,75	1,05	0,60
6. Початок збирання помідор	1400	0,75	0,80	0,70
7. Кінець збирання помідор	2600	0,75	0,60	0,70
<b>КАПУСТА РАННЯ</b>				
2. Посадка	0	0,11	0,95	0,40
3. Зав'язування качана	430	0,16	0,95	0,50
4. Технічна стиглість	1050	0,81	0,85	0,60
9. Збирання врожаю	1400	0,90	0,85	0,60
<b>КАПУСТА ПІЗНЯ</b>				
2. Посадка	0	0,11	0,95	0,40
3. Зав'язування качана	590	0,17	0,95	0,50
4. Технічна стиглість	1800	1,00	0,92	0,60
9. Збирання врожаю	2500	1,00	0,80	0,60
<b>КАРТОПЛЯ СЕРЕДНЯ</b>				
2. Посадка	0	0,00	0,85	0,40
3. Сходи	380	0,12	0,90	0,50
4. Бутонізація	950	0,57	1,00	0,60
5. Бульбоутворення	1000	1,00	1,00	0,60
6. Початок квітання	1275	1,00	1,03	0,60
7. Кінець квітання	1500	1,00	1,05	0,60
8. Відмирання нижніх листків	2400	1,00	0,90	0,60
9. Збирання врожаю	2700	1,00	0,88	0,60

**Додаток Е**

**Пружність насиченості пару  $l_a$ , мб**

Цілі градуси, $^\circ\text{C}$	Десяті частки градуса									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	8,1	8,2	8,2	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,6	8,7
5	8,7	8,8	8,8	8,9	9,0	9,1	9,2	9,2	9,2	9,3
6	9,4	9,4	9,5	9,5	9,6	9,7	9,7	9,8	9,9	10,0
7	10,0	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,6	10,6
8	10,7	10,8	10,9	11,0	11,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,4
9	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,9	12,0	12,0	12,1	12,2
10	12,3	12,4	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	13,0	13,0
11	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,8	13,9
12	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9
13	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9
14	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9
15	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	18,0	18,1
16	18,2	18,3	18,4	18,5	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1	19,3
17	19,4	19,5	19,6	19,8	19,9	20,0	20,1	20,3	20,4	20,5

Цілі градуси, °С	Десяті частки градуса									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	20,6	20,8	20,9	21,0	21,2	21,3	21,4	21,6	21,7	21,8
19	22,0	22,1	22,3	22,4	22,5	22,7	22,8	23,0	23,1	23,2
20	23,4	23,5	23,7	23,8	24,0	24,1	24,3	24,4	24,6	24,7
21	24,9	25,0	25,2	24,4	25,5	25,7	25,8	26,0	26,1	26,3
22	26,5	26,6	26,8	26,9	27,1	27,3	27,4	27,6	27,8	27,9
23	28,1	28,3	28,5	28,6	28,8	29,0	29,2	29,3	29,5	29,7
24	29,9	30,0	30,2	30,4	30,6	30,8	31,0	31,1	31,3	31,5
25	31,7	31,9	32,1	32,3	32,5	32,7	32,9	33,0	33,2	33,9
26	33,6	33,8	34,0	34,2	34,4	34,6	34,9	35,1	35,3	35,5
27	35,7	35,9	36,1	36,3	36,5	36,8	37,0	37,2	37,4	37,6
28	37,8	38,1	38,3	36,5	38,7	39,0	39,2	39,4	39,6	39,9
29	40,1	40,3	40,6	40,8	41,0	41,3	41,5	41,8	42,0	42,2
30	42,5	42,7	43,0	43,2	43,5	43,7	44,0	44,2	44,5	44,7
31	45,0	45,2	45,5	45,8	46,0	46,3	45,5	46,8	47,1	47,3
32	47,6	47,9	48,1	48,4	48,7	49,0	49,2	49,5	49,8	50,1
33	50,4	50,6	50,9	51,2	51,5	51,8	52,1	52,4	52,7	53,0
34	53,3	53,6	53,8	54,2	54,5	54,8	55,1	55,4	55,7	56,0

**Додаток Ж**

**Єдині (осереднені за часом) коефіцієнти культур  $K_C$  і середня максимальна висота рослин для не схильних стресу, добре зволужених культур в субвологодому кліматі ( $RH_{min} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2$  м/с) з використанням рівняння Пенмана-Монтейта  $ET_0$**

Культура	$K_{C,ini}^1$	$K_{C,mid}$	$K_{C,end}$	Максимальна висота рослин, h, м
<b>Дрібні овочі</b>	<b>0,7</b>	<b>1,05</b>	<b>0,95</b>	
Капуста (качан)		1,05	0,95	0,4
Морква		1,05	0,95	0,3
Цвітня капуста		1,05	0,95	0,4
Часник		1,00	0,7	0,3
Цибуля – суха		1,05	0,75	0,4
- зелена		1,00	1,00	0,3
- насіння		1,05	0,80	0,5
Редиска		0,90	0,85	0,3
<b>Овочі – родини пасльонових</b>	<b>0,6</b>	<b>1,15</b>	<b>0,80</b>	
Баклажан		1,05	0,90	0,8
Солодкий перець		1,05 <sup>2</sup>	0,90	0,70
Томат		1,05 <sup>2</sup>	0,70-0,90	0,6
<b>Овочі – родина гарбузові</b>	<b>0,5</b>	<b>1,00</b>	<b>0,80</b>	
Огірок - овочевий ринок	0,6	1,00 <sup>2</sup>	0,75	0,3
- машинне збирання	0,5	1,00	0,90	0,3
Гарбуз, зимові великі гарбузи		1,00	0,75	0,3
Великі столові гарбузи, цукіні		0,95	0,75	0,3
Солодка диня		1,05	0,75	0,4
Кавун	0,4	1,00	0,75	0,4
<b>Коренеплоди</b>	<b>0,5</b>	<b>1,10</b>	<b>0,95</b>	
Буряк столовий		1,05	0,95	0,4
Картопля		1,15	0,75 <sup>4</sup>	0,6

Культура	$K_{C,ini}^1$	$K_{C,mid}$	$K_{C,end}$	Максимальна висота рослин, h, м
Буряк цукровий	0,35	1,20	0,75 <sup>5</sup>	0,5
<b>Бобові</b>	<b>0,4</b>	<b>1,15</b>	<b>0,55</b>	
Квасоля, зелена	0,5	1,05 <sup>2</sup>	0,90	0,4
Квасоля, суха і боби	0,4	1,15 <sup>2</sup>	0,35	0,4
Чечевиця		1,10	0,3	0,5
Горох - свіжий (зелений)	0,5	1,15 <sup>2</sup>	1,10	0,5
- сухий/насіння		1,15	0,30	0,5
Соєві боби		1,15	0,50	0,5-1,0
<b>Волокнисті культури</b>	<b>0,35</b>			
Бавовник		1,15-1,20	0,70-0,50	1,2-1,5
Льон		1,10	0,25	1,2
<b>Масляничні культури</b>	<b>0,35</b>	<b>1,15</b>	<b>0,35</b>	
Насіння рапсу		1,0-1,15 <sup>9</sup>	0,35	0,6
Соняшник		1,0-1,15 <sup>9</sup>	0,35	2,0
<b>Зернові культури</b>	<b>0,30</b>	<b>1,15</b>	<b>0,40</b>	
Ячмінь		1,15	0,40	1,0
Овес		1,15	0,25	1,0
Яра пшениця		1,15	0,25-0,4 <sup>10</sup>	1,0
Озима пшениця				
- з мерзлим ґрунтом	0,40	1,15	0,25-0,4 <sup>10</sup>	1,0
- з не мерзлим ґрунтом	0,7	1,15	0,25-0,4 <sup>10</sup>	
Кукурудза, польова (зелена)		1,20	0,6-0,35 <sup>11</sup>	2,0
Кукурудза, солодка		1,15	1,05 <sup>12</sup>	1,5
Просо		1,00	0,30	1,5
Сорго - зелене		1,00-1,10	0,55	1-2
- солодке		1,20	1,05	2-4
Рис	1,05	1,20	0,90-0,60	1,0
<b>Фуражні</b>				
Люцерна фуражна:				
- осереднений ефект укосів	0,40	0,95 <sup>13</sup>	0,90	0,7
- періоди індивідуальних укосів	0,40 <sup>14</sup>	1,20 <sup>14</sup>	1,15 <sup>14</sup>	0,7
- на насіння	0,40	0,50	0,50	0,7
Конюшина, сіно:				
- осереднений ефект укосів	0,40	0,90 <sup>13</sup>	0,85	0,6
- періоди індивідуальних укосів	0,40 <sup>14</sup>	1,15 <sup>14</sup>	1,14 <sup>14</sup>	0,6
Суданська трава (щорічно):				
- осереднений ефект укосів	0,50	0,90 <sup>14</sup>	0,85	1,2
- періоди індивідуальних укосів	0,50 <sup>14</sup>	1,15 <sup>14</sup>	1,10 <sup>14</sup>	1,2
Пасовища: - чергові випасання	0,40	0,85-1,05	0,85	0,15-0,30
- екстенсивне випасання	0,30	0,75	0,75	0,10
<b>Виноград та ягоди</b>				
Ягоди (кущі)	0,30	1,05	0,50	1,5
Виноград:				
- столовий або родзинки	0,30	0,85	0,45	2,0
- винний	0,30	0,70	0,45	1,5-2,0
<b>Фруктові дерева</b>				
Яблуня, вишня, груша <sup>19</sup>				



Культура	$K_{C,ini}^1$	$K_{C,mid}$	$K_{C,end}$	Максимальна висота рослин, h, м
- не закриває землю, убив.холод	0,45	0,95	0,70 <sup>18</sup>	4,0
- не закриває землю, без морозів	0,60	0,95	0,75 <sup>18</sup>	4,0
- активний покрив землі, уб.хол.	0,50	1,20	0,95 <sup>18</sup>	4,0
- активний покрив землі, без мор	0,80	1,20	0,85 <sup>18</sup>	4,0
Абрикоси, персики, кісточкові <sup>19,20</sup>				
- не закриває землю, вбив.холод	0,45	0,90	0,65 <sup>18</sup>	3,0
- не закриває землю, без морозів	0,55	0,90	0,65 <sup>18</sup>	3,0
- активний покрив землі, вб.хол.	0,50	1,15	0,90 <sup>18</sup>	3,0
- активний покрив землі, без мор	0,80	1,15	0,85 <sup>18</sup>	3,0
Цитрусові, не закриває землю <sup>21</sup> :				
70 % крони	0,70	0,65	0,70	4
50 % крони	0,65	0,60	0,65	3
20 % крони	0,50	0,45	0,55	2
Цитрусові, з активним покриттям землі або бур'янами <sup>22</sup> :				
70 % крони	0,75	0,70	0,75	4
50 % крони	0,80	0,80	0,80	3
20 % крони	0,85	0,85	0,85	2
Хвойні дерева <sup>23</sup>	1,00	1,00	1,00	10,0
Оливи (40-60 % землі, закрита кроною) <sup>24</sup>	0,65	0,70	0,70	3-5
Сад волоські горіхи <sup>19</sup>	0,50	1,10	0,65 <sup>18</sup>	4-5
<b>Спеціальні культури</b>				
Відкрита водна поверхня менше 2 м глибиною або напіввологий клімат або тропіки		1,05	1,05	
Відкрита водна поверхня більше 5 м глибиною, чиста або каламутна, помірний клімат		0,65 <sup>25</sup>	1,25 <sup>25</sup>	

- 1 Це загальні значення для  $K_{C,ini}$  при типовому управлінні іригацією і зволоження ґрунту. Для такої частоти зволоження як дощування високої частоти або щоденні опади, ці значення можуть значно збільшитись і досягти 1,0 до 1,2.  $K_{C,ini}$  є функцією інтервалу зволоження і швидкості потенціального випаровування протягом початкового періоду і періоду розвитку.
- 2 Квасоля, горох, бобові, томати, перець і огірки іноді ростуть на довгих стеблах, які досягають 1,5-2,0 м у висоту. В подібних випадках потрібно брати підвищені значення  $K_C$ . Для зеленої квасолі, перця і огірків може бути прийняте значення 1,15, а для томатів, сухої квасолі і гороху - 1,20. При таких умовах  $h$  повинна бут також збільшена.
- 4 Значення  $K_{C,end}$  для картоплі дорівнює приблизно 0,40 для картоплі з тривалою вегетацією і наявністю шкідників.
- 5 Це значення  $K_{C,end}$  дано для відсутності зрошення під час кінцевої стадії вегетаційного періоду. Значення  $K_{C,end}$  для буряків цукрових вище, під час зрошення або значного дощу протягом останнього місяця – до 1,0.
- 6 Перший  $K_{C,end}$  даний для збирання свіжих овочів. Друге значення – для збирання сухих овочів.
- 9 Знижені значення дані для незрошуваних культур з меншою щільністю популяцій рослин.
- 10 Підвищені значення типові для культур, які збираються вручну.
- 11 Перше значення  $K_{C,end}$  для збору зернових високої вологості. Друге значення  $K_{C,end}$  для

- збирання повністю висушлих зернових (біля 18 % вологості, основа вологої маси).
- 12 В випадку збирання свіжими для потреб людей. Застосування  $K_{c,end}$  для кукурудзи у випадку, коли соловка кукурудза повністю достигла і висухла.
  - 13 Цей коефіцієнт  $K_{c,mid}$  для фуражних культур є загальним середнім коефіцієнтом  $K_{c,mid}$ , який осереднює обидва коефіцієнти  $K_c$  до і після укосу. Застосовується в період, слідує за першим періодом розвитку до початку кінцевої пізньої фази вегетаційного періоду.
  - 14 Ці коефіцієнти  $K_c$  для фуражних культур представляють ситуацію, що безпосередньо слідує за косовицею; повний покрив; і безпосередньо перед косовицею. Вегетаційний період описаний як серія періодів індивідуальною косовиці.
  - 17 Включає вимоги на воду затінених дерев.
  - 18 Ці значення  $K_{c,end}$  представляють  $K_c$  до листопада. Після листопада  $K_{c,end} \approx 0,20$  для оголеного сухого ґрунту або мерзлої земляної підстилки і  $K_{c,end} \approx 0,50-0,80$  для активно рослого земляного покриву.
  - 19 Потребує додаткових досліджень для нестандартних умов для розрахунків  $K_c$  для недозрілих сходів.
  - 20 До категорії кісточкових дерев відносяться персики, абрикоси, груші, сливи і горіхи пекан.
  - 21 Ці значення  $K_c$  можуть бути розраховані із рівняння 98 для  $K_{c,min} = 0,15$  і  $K_{c,ful} = 0,75, 0,70$  та  $0,75$  для початкового, середнього та кінцевого сезонів вегетаційного періоду, а  $f_{c,eff} = f_c$  = частина землі, покритою кроною дерев (тобто передбачається, що Сонце знаходиться прямо над головою). Перелічені значення відповідають значенням по Дуренбосу і Прутту (1977) і більш сучасним вимірюванням. Значення середини сезону нижче значень початкового і кінцевого сезонів через вплив закриття продіхів під час пікових періодів  $ET$ . Для вологого і напіввологого кліматів, де контроль продіхів менше, для цитрусових значення  $K_{c,ini}$ ,  $K_{c,mid}$  і  $K_{c,end}$  можуть збільшуватись до  $0,1-0,2$  (Роджерс та ін., 1983).
  - 22 Ці значення  $K_c$  розглядаються як  $K_c = f_c K_{c,ngc} + (1 - f_c) K_{c,cover}$ , де  $K_{c,ngc}$  це  $K_c$  цитрусових культур з неактивним покриттям землі (розрахованим як в посиланні 21),  $K_{c,cover} - K_c$  з активним покритвом землі ( $0,95$ ) і  $f_c$  визначений в посиланні 21. Перелічені значення відповідають Дуренбосу і Прутту (1977) і найбільш сучасним вимірюванням.  $K_c$  для цитрусових з активним покритвом землі також може бути розрахований безпосередньо із рівняння 98, виконуючи  $K_{c,min} = K_{c,cover}$ . Для волого і напіввологого кліматів, де контроль продіхів менше, для цитрусових значень  $K_{c,ini}$ ,  $K_{c,mid}$  і  $K_{c,end}$  можуть збільшуватись до  $0,1-0,2$ , (Роджерс і др., 1983). Для неактивного або поміреного покриття землі (активний означає зелений і ростучий покрив з  $LAI > 2-3$ ),  $K_c$  повинен оцінюватись як середнє значення між  $K_c$  без покриття землі і  $K_c$  з активним покриттям землі на основі «ступеня озеленення» і приблизної листової площі покриву.
  - 23 Представляє суттєвий продиховий контроль дякуючи зменшеному аеродинамічному опору.  $K_c$  можна легко зменшити нижче представлених значень при доброму зволоженню великих лісових масивів.
  - 24 Ці коефіцієнти представляють 60 % покриття землі.
  - 25 Ці коефіцієнти для глибокої води в помірних широтах, де зустрічаються великі температурні зміни у водному тілі, а випаровування начального і пікового періодів нижче, так як енергія випромінювання абсорбується в глибоке водне тіло. В осінній і зимовий періоди ( $K_{c,end}$ ) тепло звільнюється із водного тіла, що збільшує випаровування. Тому  $K_{c,mid}$  відповідає періоду, коли водне тіло отримує термальну енергію, а  $K_{c,end}$  – коли звільняється термальна енергія. Ці коефіцієнти  $K_c$  повинні використовуватись обережно.

Первинні джерела:

$K_{c,ini}$ : Дуренбос і Кассам (1979 з.)

$K_{c,mid}$  і  $K_{c,end}$ : Дуренбос і Прутт (1977 з.); Прутт (1986 з.); Райт (1981, 1982 з.), Шнайдер та ін. (1989 з.)

Річард Аллен Р., С. Луїс Перейра, Дірк Раес, Мартін Сміт (1998)

Границі максимальної ефективної глибини коріння ( $Z_r$ ) і частка забору води без стресу ( $p$ ), для загальних культур

Культура	Максимальна глибина коренів, м	Частка забору <sup>2</sup> (для ET=5 мм/добу), $p$
<b>Дрібні овочі</b>		
Капуста	0,5-0,8	0,45
Морква	0,5-1,0	0,35
Капуста цвітна	0,4-0,7	0,45
Часник	0,3-0,5	0,30
Цибуля - суха	0,3-0,6	0,30
- зелена	0,3-0,6	0,30
- насіння	0,3-0,6	0,35
Редиска	0,3-0,5	0,30
<b>Овочі – родина пасльонових</b>		
Баклажан	0,7-1,2	0,45
Перець солодкий (колокол)	0,5-1,0	0,30
Помідор	0,7-1,5	0,40
<b>Овочі – родини гарбузових</b>		
Огірок: - зелений базар	0,7-1,2	0,50
- машинне збирання	0,7-1,2	0,50
Гарбуз, гарбузи великі	1,0-1,5	0,45
Кабачок, цукіні	0,6-1,0	0,35
Солодкий кавун	0,8-1,5	0,40
Кавун	0,8-1,5	0,40
<b>Коренеплоди</b>		
Бурак	0,6-1,0	0,50
Картопля	0,4-0,6	0,35
Бурак цукровий	0,7-1,2	0,55 <sup>3</sup>
<b>Бобові</b>		
Квасоля, горох	0,5-0,7	0,45
Квасоля зелена і боби	0,6-0,9	0,45
Чечевиця	0,6-0,8	0,50
Горох: - нестиглий (зелений)	0,6-1,0	0,35
- стиглий /насіння	0,6-1,0	0,40
Сосві боби	0,6-1,3	0,50
<b>Волокнисті культури</b>		
Бавовник	1,0-1,7	0,65
Льон	1,0-1,5	0,50
<b>Масляничні культури</b>		
Насіння рапу	1,0-1,5	0,60
Соняшник	0,8-1,5	0,45
<b>Зернові</b>		
Ячмінь	1,0-1,5	0,55
Овес	1,0-1,5	0,55
Ярова пшениця	1,0-1,5	0,55
Озима пшениця	1,5-1,8	0,55
Кукурудза: - польова (зерно)	1,0-1,7	0,55
- кукурудза цукрова	0,8-1,2	0,50

Культура	Максимальна глибина коренів, м	Частка забору <sup>2</sup> (для $ET=5$ мм/добу), $p$
Просо	1,0-2,0	0,55
Сорго: - зерно	1,0-2,0	0,55
- цукрове	1,0-2,0	0,55
Рис	0,5-1,0	0,20 <sup>4</sup>
<b>Кормові культури</b>		
Люцерна: - на сіно	1,0-2,0	0,55
- на насіння	1,0-3,0	0,60
Конюшина, берсим	0,6-0,9	0,50
Райграс пасовищний	0,6-1,0	0,60
Суданська трава (однорічна)	1,0-1,5	0,55
Пасовища: - перемінне пасовище	0,5-1,5	0,60
- екстенсивне випасання	0,5-1,5	0,60
<b>Виноград і ягоди</b>		
Ягоди (кущі)	0,6-1,2	0,50
Виноград: - столовий або ізюм	1,0-2,0	0,35
- винний	1,0-2,0	0,45
<b>Фруктові дерева</b>		
Яблуни, вишні, груші	1,0-2,0	0,40
Абрикоси, персики, кісточкові плоди	1,0-2,0	0,50
Цитруси: - 70 % крони	1,2-1,5	0,50
- 50 % крони	1,1-1,5	0,50
- 30 % крони	0,8-1,1	0,50
Хвойні дерева	1,0-1,5	0,70
Оливки (40-60 % покриття землі)	1,2-1,7	0,65
Горохові сади	1,7-2,4	0,50
<p>1 Високі значення <math>Z_r</math> для ґрунтів, що не мають значного покриття або інших характеристик, які можуть обмежити глибину залягання коріння. Низькі значення <math>Z_r</math> можуть бути використані для зрошення, а високі значення – для моделювання водного стрес або для умов незрошуваних земель.</p> <p>2 Значення «<math>p</math>» застосовуються для <math>ET_c \approx 5</math> мм/сут. Значення «<math>p</math>» може бути уточнено для різних коефіцієнтів <math>ET_c</math> згідно <math>p = p_{\text{табл. 22}} + 0,04 (5 - ET_c)</math>, де «<math>p</math>» виражено як частка <math>ET_c</math> в мм/добу.</p> <p>3 Буяки цукрові часто підлягає в'яненню після полудня в аридному кліматі навіть при <math>p &lt; 0,55</math>.</p> <p>4 Значення «<math>p</math>» для рису – 0,20 від насичення.</p> <p>5 До трав прохолодного сезону відносяться м'ятлик луковий, райграс пасовищний і овсяниця. До трав теплого сезону відносяться бермудська трава, буйволова трава і трава Св. Августина. Коренева зона у трав має різну глибину. Деякі корені досягають 1,2 м і більше, в той час, як у інших трав коренева зона неглибока. Трави мають більш глибоку кореневу зону при бережному управлінні водними ресурсами з більшим висиханням ґрунту між поливами, щоб корені розростались на більшу глибину.</p>		

## Додаток Л

Солестійкість сільськогосподарських культур, виражена через електричну провідність насиченої витяжки на порозі, коли врожайність падає нижче повного потенціалу врожайності ( $EC_{e,threshold}$ ) і через уклон ( $b$ ) зменшення врожайності при збільшенні засолення вище  $EC_{e,threshold}$

Сільськогосподарська культура <sup>1</sup>	$EC_{e,threshold}$ <sup>2</sup> , дСм/м <sup>3</sup>	$b$ <sup>4</sup> , %/(дСм·м)	Оцінка <sup>5</sup>
Дрібні овочі			
Капуста	1,0-1,8	9,8-140,0	MS
Морква	1,0	14,0	S
Цвітна капуста	1,8	6,2	MS
Цибуля	1,2	16,0	S
Редиска	1,2-2,0	7,6-13,0	MS
Овочі – родини пасльонові			
Баклажан	-	-	MS
Перець	1,5-1,7	12,0-14,0	MS
Томат	0,9-2,5	9,0	MS
Овочі – родина гарбузові			
Огірок	1,1-2,5	9,0	MS
Диня	-	-	MS
Гарбуз, зимовий	1,2	13,0	MS
Кабачок, пукіні	4,7	10,0	MT
Кабачок (фестончатої форми)	3,2	16,0	MS
Кавун	-	-	MS
Коренеплоди			
Бурак столовий	4,0	9,0	MT
Картопля	1,7	12,0	MS
Бурак цукровий	7,0	5,9	T
Бобові			
Боби, червоні	1,0	19,0	S
Горох	1,5	14,0	S
Сосві боби	5,0	20,0	MT
Волокнисті культури			
Бавовник	7,7	5,2	T
Льон	1,7	12,0	MS
Масляничні культури			
Соняшник	-	-	MS
Зернові			
Ячмінь	8,0	5,0	T
Овес	-	-	MT
Кукурудза	1,7	12,0	MS
Кукурудза солодка	1,7	12,0	MS
Просо	-	-	MS
Сорго	6,8	16,0	MT
Рис <sup>6</sup>	3,0	12,0	S
Пшениця	6,0	7,1	MT
Пшениця напівкарликова	8,6	3,0	T
Пшениця тверда	5,7-5,9	3,8-5,5	T
Кормові			
Люцерна	2,0	7,3	MS

Сільськогосподарська культура <sup>1</sup>	$EC_e, threshold$ <sup>2</sup> , дСм/м <sup>3</sup>	$b$ <sup>4</sup> , %/(дСм·м)	Оцінка <sup>5</sup>
Ячмінь (кормовий)	6,0	7,1	MT
Конюшина, берсिम	1,5	5,7	MS
Конюшина (шведська, червона, дика)	1,5	12,0	MS
Овсяниця	3,9	5,3-6,2	MT
Лисохвіст	1,5	9,6	MS
Кукурудза (кормова)	1,8	7,4	MS
Райграс (багаторічний)	5,6	7,6	MT
Суданська трава	2,8	4,3	MT
Лядвенець звичайний	5,0	10,0	MT
Лядвенець болотний	2,3	19,0	MS
Вика звичайна	3,0	11,0	MS
Житняк високий	7,5	4,2	T
Житняк гребневидний, виведений	7,5	6,9	T
Волоснець, безостий	2,7	6,0	MT
Виноград і ягоди			
Ожина	1,5	22,0	S
Виноград	1,5	9,6	MS
Полуниця	1,0-1,5	11,0-33,0	S
Цитрусові (грейпфрут)	1,8	16,0	S
Цитрусові (апельсин)	1,7	16,0	S
Цитрусові (лимон)	-	-	S
Цитрусові (лайм)	-	-	S
Цитрусові (мандарин)	-	-	S
Хвойні дерева	-	-	MS/MT
Плодові дерева			
- яблуна	-	-	S
- персик	1,7	21,0	S
- вишня	-	-	S
- груша	-	-	S
- абрикос	1,6	24,0	S
- слива, чорнослив	1,5	18,0	S
- гранат	-	-	S

1 Дані служать тільки як рекомендації. Властивості змінюються залежно від клімату, ґрунтових умов і агротехніки. Культури зазвичай менш стійкі під час проростання.

2  $EC_e, threshold$  означає середнє засолення кореневої зони, при якому врожайність розпочинає знижуватись.

3 Засолення кореневої зони вимірюється через електричну провідність насиченої витяжки, які визначають в децисименсах на метр (дСм/м) при 25 °С.

4  $b$  – це процентне зменшення врожайності до 1 дСм/м збільшення  $EC_e$  вище  $EC_e, threshold$ .

5 Використовуються такі оцінки: T = стійка, MT = середньостійка, MS = середньочутлива, S = чутлива

6 Так як падді рис росте в умовах затоплення, величини відносяться до електричної провідності ґрунтової вологи, коли рослини занурені у воду.

Першоджерела:

Ayers and Westcot, 1985. *FAO Irrigation and Drainage Paper No 29. Water quality for agriculture;*

Rhoades, Kandiah and Mashali, 1992. *FAO Irrigation and Drainage Paper No 48. The use of saline waters for crop productions.*



## Порядковий номер дня в році (J)

День	Місяць											
	01	02	03*	04*	05*	06*	07*	08*	09*	10*	11*	12*
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29	(60)	88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90	121	151	182	212	243	274	304	335	365

\* Якщо високосний рік необхідно додати 1.



Таблиця 0 – Середні денні години (N) для різних широт для 15-го дня місяця¹

	Місяць, північна півкуля															Град. шир.									
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03		04	05	06	07	08	09	10	11	12
0.0	6.6	11.0	15.6	21.3	24.0	24.0	17.6	12.8	8.3	2.3	0.0	7.0	24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0	
2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0	68	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0	
3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	16.4	12.7	9.0	5.2	1.9	66	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1	
5.0	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.3	6.0	3.7	64	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3	
5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8	62	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2	
6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6	60	17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4	
6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2	58	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8	
7.3	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7	56	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3	
7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1	54	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9	
8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5	52	16.0	14.3	12.5	10.4	8.6	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5	
8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9	50	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1	
8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2	48	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8	
8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5	46	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5	
9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7	44	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3	
9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0	42	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0	
9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2	40	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8	
9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4	38	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6	
9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6	36	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4	
10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7	34	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3	
10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9	32	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1	
10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1	30	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9	
10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	28	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	
10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4	26	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6	
10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	24	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5	
10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7	22	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3	
10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8	20	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2	
11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	18	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1	
11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	16	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9	
11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2	14	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8	
11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	12	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	
11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	10	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	
11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5	8	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5	
11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	6	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.1	11.9	11.8	11.8	4	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.7	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	11.9	11.9	11.9	2	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

1. Значення для N на 15-й день місяця забезпечують точний розрахунок (похибка менше 1 %, N, осередненого по всіх днях місяця. Тільки для високого широт, що перевищують 55° (пн. ш. або пд. ш.), в зимові місяці відхилення можуть перевищувати 1 %.

$\sigma T_K^4$  (Закон Стефана-Больцмана) при різних температурах (Т)

Т, °С	$\sigma T_K^4$ , (МДж/(м <sup>2</sup> добу))	Т, °С	$\sigma T_K^4$ , (МДж/(м <sup>2</sup> добу))	Т, °С	$\sigma T_K^4$ , (МДж/(м <sup>2</sup> добу))
1,0	27,70	17,0	34,75	33,0	43,08
1,5	27,90	17,5	34,99	33,5	43,36
2,0	28,11	18,0	35,24	34,0	43,64
2,5	28,31	18,5	35,48	34,5	43,93
3,0	28,52	19,0	35,72	35,0	44,21
3,5	28,72	19,5	35,97	35,5	44,50
4,0	28,93	20,0	36,21	36,0	44,79
4,5	29,14	20,5	36,46	36,5	45,08
5,0	29,35	21,0	36,71	37,0	45,37
5,5	29,56	21,5	36,96	37,5	45,67
6,0	29,78	22,0	37,21	38,0	45,96
6,5	29,99	22,5	37,47	38,5	46,26
7,0	30,21	23,0	37,72	39,0	46,56
7,5	30,42	23,5	37,98	39,5	46,85
8,0	30,64	24,0	38,23	40,0	47,15
8,5	30,86	24,5	38,49	40,5	47,46
9,0	31,08	25,0	37,75	41,0	47,76
9,5	31,30	25,5	39,01	41,5	48,06
10,0	31,52	26,0	39,27	42,0	48,37
10,5	31,74	26,5	39,53	42,5	48,68
11,0	31,97	27,0	39,80	43,0	48,99
11,5	31,19	27,5	40,06	43,5	49,30
12,0	32,42	28,0	40,33	44,0	49,61
12,5	32,65	28,5	40,60	44,5	49,92
13,0	32,88	29,0	40,87	45,0	50,24
13,5	33,11	29,5	41,14	45,5	50,56
14,0	33,34	30,0	41,41	46,0	50,87
14,5	33,57	30,5	41,69	46,5	51,19
15,0	33,81	31,0	41,96	47,0	51,51
15,5	34,04	31,5	41,24	47,5	51,84
16,0	34,28	32,0	42,52	48,0	52,16
16,5	31,52	32,5	42,80	48,5	51,49

*Градiєнт кривої тиску пара ( $\Delta$ ) для різних температур ( $T$ )*

$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta,$ кПа/ $^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta,$ кПа/ $^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta,$ кПа/ $^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta,$ кПа/ $^\circ\text{C}$
1,0	0,047	13,0	0,098	25,0	0,189	37,0	0,342
1,5	0,049	13,5	0,101	25,5	0,194	37,5	0,350
2,0	0,050	14,0	0,104	26,0	0,199	38,0	0,358
2,5	0,052	14,5	0,107	26,5	0,204	38,5	0,367
3,0	0,054	15,0	0,110	27,0	0,209	39,0	0,375
3,5	0,055	15,5	0,113	27,5	0,215	39,5	0,384
4,0	0,057	16,0	0,116	28,0	0,220	40,0	0,393
4,5	0,059	16,5	0,119	28,5	0,226	40,5	0,402
5,0	0,061	17,0	0,123	29,0	0,231	41,0	0,412
5,5	0,063	17,5	0,126	29,5	0,237	41,5	0,421
6,0	0,065	18,0	0,130	30,0	0,243	42,0	0,421
6,5	0,067	18,5	0,133	30,5	0,249	42,5	0,441
7,0	0,069	19,0	0,137	31,0	0,256	43,0	0,451
7,5	0,071	19,5	0,141	34,5	0,262	43,5	0,461
8,0	0,073	20,0	0,145	32,0	0,269	44,0	0,471
8,5	0,075	20,5	0,149	32,5	0,275	44,5	0,482
9,0	0,078	21,0	0,153	33,0	0,282	45,0	0,493
9,5	0,080	21,5	0,157	33,5	0,289	45,5	0,504
10,0	0,082	22,0	0,161	34,0	0,296	46,0	0,515
10,5	0,085	22,5	0,165	34,5	0,303	46,5	0,526
11,0	0,087	23,0	0,170	35,0	0,311	47,0	0,538
11,5	0,090	23,5	0,174	35,5	0,318	47,5	0,550
12,0	0,092	24,0	0,179	36,0	0,326	48,0	0,562
12,5	0,095	24,5	0,184	36,5	0,334	48,5	0,574

Режим зрошення основних сільськогосподарських культур для років забезпеченості  
75 % за дефіцитом водоспоживання при доброму ґрунтово-екологічному стані земель України

Сільськогосподарська культура	№ поливу	Лісостеп				Північний степ				Південний степ			
		полівна норма, м <sup>3</sup> /га	строки поливу		полівна норма, м <sup>3</sup> /га	строки поливу		полівна норма, м <sup>3</sup> /га	строки поливу		полівна норма, м <sup>3</sup> /га	строки поливу	
			початок	кінець		початок	кінець		початок	кінець		початок	кінець
Пшениця озима	В	600	20.08	26.08	600	25.08	31.08	600	1.09	10.09	600	1.09	10.09
	1	300	17.05	22.05	300	10.05	13.05	300	28.04	31.04	300	28.04	31.04
	2	400	25.05	30.05	400	25.05	29.05	400	9.05	12.05	400	9.05	12.05
	3	400	10.06	15.06	400	5.06	9.06	400	23.05	26.05	400	23.05	26.05
Куркудза на зерно (середньостиглі гібриди)	4	400	18.06	23.06	400	15.06	19.06	400	13.05	16.06	400	13.05	16.06
	1	300	3.07	7.07	300	11.06	14.06	300	7.06	10.06	300	7.06	10.06
	2	300	15.07	19.07	300	23.06	26.06	300	20.06	23.06	300	20.06	23.06
	3	300	25.07	29.07	300	6.07	9.07	300	30.06	3.07	300	30.06	3.07
	4	300	5.08	9.08	400	20.07	23.07	300	13.07	16.07	300	13.07	16.07
	5	300	15.08	19.08	400	1.08	4.08	400	20.07	23.07	400	20.07	23.07
	6	400	13.08	17.08	400	13.08	17.08	400	31.07	3.08	400	31.07	3.08
Соя	7												
	1	300	20.06	24.06	300	13.06	16.06	300	13.06	15.06	300	13.06	15.06
	2	300	30.06	3.07	300	26.06	30.06	300	20.06	22.06	300	20.06	22.06
	3	400	10.07	14.07	400	3.07	7.07	300	29.06	1.07	300	29.06	1.07
	4	400	23.07	27.07	400	17.07	21.07	300	7.07	9.07	300	7.07	9.07
	5	400	5.08	9.08	400	30.07	3.08	300	15.07	17.07	300	15.07	17.07
	6	400	11.08	15.08	400	11.08	15.08	400	25.07	28.07	400	25.07	28.07
	7												
Помідори розсадні	8												
	1	200	23.05	25.05	200	21.05	23.05	200	9.05	11.05	200	9.05	11.05
	2	300	20.06	24.06	300	30.05	3.06	300	29.05	31.05	300	29.05	31.05
	3	300	2.07	6.07	300	26.06	30.06	300	16.06	20.06	300	16.06	20.06
	4	300	14.07	17.07	300	7.07	10.07	300	29.06	2.07	300	29.06	2.07
	5	400	24.07	27.07	400	18.07	23.07	350	8.07	12.07	350	8.07	12.07
	6	400	2.08	5.08	400	29.07	2.08	350	18.07	21.07	350	18.07	21.07
	7	400	10.08	13.08	400	7.08	10.08	400	27.07	30.07	400	27.07	30.07
	8												
9													

## Продовження додатку С

Сільськогосподарська культура	№ поливу	Лісостеп				Північний степ				Південний степ			
		полівна норма, м <sup>3</sup> /га		строки поливу		полівна норма, м <sup>3</sup> /га		строки поливу		полівна норма, м <sup>3</sup> /га		строки поливу	
		початок	кінець	початок	кінець	початок	кінець	початок	кінець	початок	кінець	початок	кінець
Картопля	1	300	4.06	7.06	300	24.05	27.05	300	14.05	16.05	300	14.05	16.05
	2	300	17.06	21.06	300	3.06	6.06	300	25.05	28.05	300	25.05	28.05
	3	300	30.06	4.07	300	17.06	20.06	300	5.06	8.06	300	5.06	8.06
	4	300	15.07	19.07	400	28.06	1.07	300	16.06	19.06	300	16.06	19.06
	5	400	29.07	2.08	300	17.06	20.06	400	25.06	29.06	300	25.06	29.06
Буряки кормові	1	300	15.06	19.06	300	17.06	20.06	300	30.05	2.06	300	30.05	2.06
	2	300	25.06	29.06	300	29.06	2.07	300	7.06	10.06	300	7.06	10.06
	3	300	5.07	9.07	300	7.07	10.07	300	15.06	18.06	300	15.06	18.06
	4	400	15.07	19.07	400	15.07	18.07	300	25.06	28.06	300	25.06	28.06
	5	400	25.07	29.07	400	25.07	28.07	400	7.07	10.07	400	7.07	10.07
	6	400	5.08	9.07	400	5.08	8.08	400	15.07	18.07	400	15.07	18.07
	7	400	15.08	19.08	400	15.08	18.08	400	22.07	25.07	400	22.07	25.07
	8				400	23.08	26.08	400	2.08	5.08	400	2.08	5.08
	9							400	15.08	18.08	400	15.08	18.08
	10							400	1.09	4.09	400	1.09	4.09
Кукурудза на силос	1	300	16.06	20.06	300	1.06	4.06	300	26.05	28.05	300	26.05	28.05
	2	300	30.06	4.07	300	10.06	13.06	300	4.06	7.06	300	4.06	7.06
	3	400	15.07	19.07	400	20.06	23.06	300	12.06	14.06	300	12.06	14.06
	4	400	27.07	31.07	400	6.07	9.07	300	25.06	28.06	300	25.06	28.06
	5	400	4.08	8.08	400	21.07	24.07	400	7.07	10.07	400	7.07	10.07
	6				400	2.08	5.08	400	20.07	23.07	400	20.07	23.07
7							400	4.08	7.08	400	4.08	7.08	
Багаторічні трави 2-го і 3-го року використання	1	500	21.05	26.05	500	20.05	26.05	500	24.04	29.04	500	24.04	29.04
	2	500	13.06	20.06	500	4.06	9.06	500	10.05	16.05	500	10.05	16.05
	3	500	18.07	22.07	500	26.06	1.07	500	9.06	15.06	500	9.06	15.06
	4	500	1.08	7.08	500	12.07	18.07	500	27.06	2.07	500	27.06	2.07
	5	500	20.08	29.08	500	28.07	2.08	500	16.07	24.07	500	16.07	24.07
	6	500	9.09	15.09	500	11.08	17.08	500	6.08	12.08	500	6.08	12.08
	7				600	4.09	12.09	500	23.08	29.08	500	23.08	29.08
	8							600	15.09	22.09	600	15.09	22.09

Продовження додатку С

Сільськогосподарська культура	№ поливу	Лісостеп			Північний степ			Південний степ		
		поливна норма, м <sup>2</sup> /га	строки початок	кінець	поливна норма, м <sup>2</sup> /га	строки початок	кінець	поливна норма, м <sup>2</sup> /га	строки початок	кінець
Однорічні трави	1	300	10.05	14.05	300	20.05	23.05			
	2	300	20.05	23.05	300	1.06	4.06			
	3	300	1.06	5.06	400	12.06	15.06			
	4	300	15.06	18.06	400	24.06	27.06			
Калушта пізня	1	200	28.05	30.05						
	2	300	3.06	6.06						
	3	300	12.06	15.06						
	4	350	21.06	24.06						
	5	350	2.07	5.07						
	6	350	15.07	18.07						
	7	350	28.07	31.07						
	8	350	15.08	18.08						
Огірки	1				200	21.05	24.05	200	1.05	4.05
	2				300	1.06	4.06	300	14.05	17.05
	3				300	19.06	22.06	300	30.05	2.06
	4				300	28.06	30.06	300	14.06	17.06
	5				300	4.07	7.07	350	26.06	30.06
	6				300	11.07	13.07	350	4.07	8.07
	7				300	18.07	20.07	400	12.07	15.07
	8				400	25.07	29.07	400	20.07	23.07
	9				400	2.08	4.08	400	28.07	31.07
	10				400			400	6.08	10.08
Кукурудза позивна	1	300	10.07	13.07	300	10.07	13.07	300	6.07	8.07
	2	300	25.07	28.07	300	21.07	24.07	300	20.07	22.07
	3	300	5.08	8.08	400	3.08	6.08	400	30.07	2.08
	4	400	25.08	30.08	400	18.08	21.08	400	8.08	11.08
	5				400	31.08	3.09	400	20.08	23.08
6							400	3.09	6.09	

**Примітка.** Режим зрошення сільськогосподарських культур наведений для районів сортив (для картоплі в лісостеповій зоні – пізніх, а в степовій ранніх; для сої в лісостеповій – ранньостиглих, а в степовій – середньостиглих).

**Додаток Т**

**Зрошувальні норми сільськогосподарських культур при водозберігаючих режимах зрошення (за кліматичними зонами України) [2]**

Сільськогосподарська культура	Забезпеченість, %	Зрошувальна норма, м <sup>3</sup> /га		
		Південний Степ	Північний Степ	Лісостеп
Пшениця озима	95	2200-2300	2200-2300	1700-1800
	75	1700-1800	1700-1800	1500-1600
Ячмінь ярий	95	1700-1800	1700-1800	1500-1600
	75	1200-1300	1200-1300	1000-1100
Ярі зернові	95	1400-1600	1300-1500	1200-1400
	75	1200-1400	1100-1300	1000-1200
Кукурудза на зерно	95	2000-2800	1800-2500	1500-1800
	75	1700-2500	1500-2300	1200-1500
Люцерна під посів ячменю або кукурудзи на з/к	95	1300-1600	1200-1500	1200-1400
	75	1000-1500	1000-1300	1000-1200
Люцерна після збирання ярого ячменю або кукурудзи на з/к	95	2400-3000	2000-2500	1300-1500
	75	1800-2400	1600-2000	1000-1200
Люцерна 2-го року	95	3400-3800	2900-3400	2600-3000
	75	3100-3400	2600-3100	2100-2400
Люцерна 3-го року	95	3000-3300	2400-2900	2100-2400
	75	2500-3000	2000-2500	1700-2000
Кукурудза на силос	95	2500-2800	2300-2500	1800-2000
	75	2300-2500	2100-2300	1600-1800
Буряк цукровий і кормовий	95	3200-3700	2400-2900	2200-2600
	75	2800-3300	1900-2500	1700-2300
Соя	95	2300-3000	2100-2500	2100-2300
	75	2100-2800	1900-2300	1900-2100
Помідор посівний	95	2900-3200	2700-3000	1600-2800
	75	2400-2700	2200-2500	2100-2300
Капуста	95	3700-4000	3300-3600	2600-2900
	75	3300-3600	2900-3200	2200-2500
Огірок	95	3400-3900	2700-3200	2200-2700
	75	3000-3500	2300-2800	1800-2300
Пожнивна кукурудза і злако-бобові на суміші на з/к	95	2200-2400	1700-1900	1400-1600
	75	1800-2000	1300-1500	1000-1200

Навчальне видання

*Віктор Іванович Доценко*  
*Вікторія Юрійвна Запорожченко*  
*Володимир Васильович*  
*Коваленко Дмитро Михайлович*  
*Онопрієнко*

Навчальний посібник  
**РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ ЗРОШЕННЯ**  
**СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР**

Друкується в авторській редакції

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, 2023  
Доценко В.І., Запорожченко В.Ю., Коваленко В.В.,  
Онопрієнко Д.М., Шинкаренко І.Ю.

Формат 60×84\16. Умовн. друк. арк. 14,3  
Тираж 50 прим. Зам № 9626

Віддруковано в ТОВ «Акцент ПП»  
вул. Бердянська, 3А, м. Дніпро, 49098  
тел. (056) 794-61-04(05)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.