

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та
водного господарства
Кафедра водної інженерії та водних технологій

02/01-03М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних занять і самостійної роботи
з навчальної дисципліни «Інноваційні системи зрошення»
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Водна інженерія та водні
технології» спеціальності G-19 «Будівництво та цивільна
інженерія» денної та заочної форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННІ ЕАВГ
Протокол № 9 від 21.04.2026 р.

Рівне – 2026

Методичні вказівки до виконання практичних занять і самостійної роботи з навчальної дисципліни «Інноваційні системи зрошення» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Водна інженерія та водні технології» спеціальності G-19 «Будівництво та цивільна інженерія» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Козішкурт С. М. Рівне : НУВГП. 2026. 57 с.

Укладач:

Козішкурт С. М. , к.т.н, доцент кафедри водної інженерії та водних технологій.

Відповідальний за випуск: Турченко В. О., д.т.н., завідувач кафедри водної інженерії та водних технологій.

Керівник (гарант) освітньої програми: Турченко В. О., д.т.н., завідувач кафедри водної інженерії та водних технологій.

© С. М. Козішкурт, 2026
© Національний університет
водного господарства та
природокористування, 2026

ЗМІСТ

Передмова	4
Практична робота 1. Аналіз водного балансу території та доступних джерел води для зрошення	5
Практична робота 2. Аналітична оцінка та вибір альтернативних джерел води для систем зрошення	8
Практична робота 3. Оцінка доцільності використання зворотного осмосу та ризиків застосування мінералізованих вод у системах зрошення	12
Практична робота 4. Оцінка можливості використання очищених стічних вод для поливу	16
Практична робота 5. Оцінка потенціалу збору атмосферних опадів та визначення об'єму резервуара для зрошення	20
Практична робота 6. Оцінка та обґрунтування систем мікрозрошення (краплинне та SDI)	23
Практична робота 7. Оцінка енергоефективності та ресурсозбереження в системах зрошення	27
Практична робота 8. Передпроектний аналіз об'єкта та обґрунтування вибору системи ландшафтного зрошення	31
Практична робота 9. Оцінка водоспоживання та енергоефективності інноваційних систем мікрозрошення в ландшафті	34
Практична робота 10. Моделювання алгоритму адаптивного управління Smart-контролера на основі водного балансу	38
Практична робота 11. Інженерна інтерпретація цифрових даних вологості ґрунту та розрахунок порогів автоматизованого поливу	42
Практична робота 12. Інженерна інтерпретація термальних знімків з БПЛА та створення карти-завдання для диференційованого зрошення	45
Практична робота 13. Оцінка екологічних ризиків вторинного засолення ґрунтів та розрахунок промивної норми	48
Практична робота 14. Комплексна техніко-економічна та екологічна оцінка ефективності впровадження Smart-систем зрошення	52
Самостійна робота	55

Передмова

Навчальна дисципліна «Інноваційні системи зрошення» є важливою складовою підготовки магістрів за програмою «Водна інженерія та водні технології». В умовах глобальних кліматичних викликів та дефіциту водних ресурсів традиційні підходи до меліорації потребують трансформації у високотехнологічні, ресурсозберігаючі та екологічно безпечні системи.

Метою цих методичних вказівок є підготовка фахівців, здатних проектувати та експлуатувати іригаційні системи нового покоління. Структура практичних робіт дозволяє студентам опанувати повний цикл інженерних рішень.

Комплексний аналіз ресурсів: оцінка водного балансу територій, пошук і вибір альтернативних джерел водопостачання, включаючи атмосферні опади та очищені стічні води.

Технологічна підготовка води: вивчення методів опріснення та оцінка ризиків використання мінералізованих вод для запобігання деградації ґрунтів.

Інноваційне проектування: порівняльне обґрунтування систем мікрозрошення (краплинного та *SDI*) та специфіки ландшафтного зрошення в умовах міського середовища.

Цифровізація та адаптивне управління: практичне застосування технологій Smart-зрошення, Smart-контролерів, БПЛА та цифрових датчиків вологості ґрунту для диференційованого розподілу води.

Еколого-економічний менеджмент: розрахунок промивних норм для боротьби із вторинним засоленням, оцінка енергоефективності насосного обладнання та визначення інвестиційної привабливості проєктів модернізації (*ROI*).

Методичне забезпечення базується на поєднанні класичних методів гідротехнічних розрахунків із сучасними ІТ-рішеннями в іригації. Кожна робота містить теоретичні відомості, алгоритм виконання та контрольні запитання для закріплення знань.

Виконання запропонованого комплексу робіт дозволить магістрантам оволодіти компетенціями, необхідними для впровадження інтелектуальних систем водокористування, що забезпечують максимальну врожайність за мінімальних витрат води та енергії.

Практична робота 1

Аналіз водного балансу території та доступних джерел води для зрошення

Мета роботи: сформулювати вміння аналізувати водний баланс території та оцінювати водні ресурси як основу для прийняття інженерних рішень щодо впровадження або вдосконалення систем зрошення.

Завдання роботи:

- проаналізувати природно-кліматичні умови території;
- дослідити складові водного балансу;
- оцінити доступні джерела води для зрошення;
- визначити характер і сезонність водного дефіциту;
- обґрунтувати доцільність впровадження зрошення.

Теоретичні відомості.

Водний баланс території характеризує співвідношення між надходженням, витратами і накопиченням води в межах певного регіону. Він формується під впливом кліматичних умов, рельєфу, ґрунтово-геологічної будови, характеру землекористування та гідрологічного режиму.

Для потреб зрошення ключове значення мають атмосферні опади, евапотранспірація, поверхневий і підземний стік, а також зміна запасів ґрунтової вологи. Навіть за відносно достатніх річних опадів дефіцит води у вегетаційний період може істотно обмежувати розвиток землеробства. Джерела води для зрошення можуть бути поверхневими, підземними або альтернативними. Їх використання визначається не лише кількістю води, а й сезонною доступністю, якістю, екологічними обмеженнями та рівнем антропогенного навантаження.

Для сучасного інженера важливо враховувати стабільність джерела протягом усього сезону, щоб гарантувати безперебійне функціонування системи зрошення.

Аналіз водного балансу – це не лише база для розрахунку водоспоживання, а насамперед інструмент для обґрунтування технічної доцільності впровадження системи зрошення.

Вихідні дані для виконання роботи.

Вихідні дані збираються з відкритих наукових, статистичних та картографічних джерел. Територія дослідження обирається у вигляді окремої країни, регіону країни або природно-кліматичної зони (табл. 1).

Таблиця 1

Типи територій за рівнем водного стресу

Тип водного стресу	Характеристика	Приклади регіонів
Хронічний водний дефіцит	Постійна нестача води	Північна Африка (Єгипет), Близький Схід
Водний стрес + кліматична мінливість	Висока міжрічна мінливість опадів	Сахель, Східна Африка (Ефіопія, Кенія)
Недовикористаний водний потенціал	Водні ресурси наявні, зрошення розвинене слабо	Субсахарська Африка (Гана, Замбія)
Інтенсивне зрошення	Високе навантаження на воду, деградація	Південна та Центральна Азія
Регіональна нерівномірність	Контраст водозабезпечення	Китай
Конкуренція за воду	Аграрний сектор та інші галузі	США, Південна Америка
Кліматична адаптація	Зрошення як відповідь на посухи	Південна Європа
Перехідні умови	Відновлення та модернізація	Південь України

Порядок виконання роботи

1. Аналіз водного балансу території

Подати стисло характеристику обраної території: географічне положення, кліматичні умови, особливості рельєфу та землекористування. Проаналізувати складові водного балансу (табл. 2).

Складові водного балансу

Показник	Значення, один. вимірювання	Джерело даних	Коментар
Атмосферні опади			
Евапотранспірація			
Стік (поверхневий, підземний)			

2. Аналіз доступних джерел води

Оцінити можливі джерела води для зрошення (поверхневі, підземні, очищені стічні води або інші альтернативні джерела). Визначити їх просторову та сезонну доступність (табл. 3).

Таблиця 3

Оцінка джерел води

Джерело води	Наявність	Стабільність	Якість	Обмеження використання	Висновок

3. Оцінка водного дефіциту

Визначити наявність водного дефіциту з урахуванням сезонності. Особливу увагу приділити співвідношенню між опадами та потенційною евапотранспірацією.

4. Аналітичне обґрунтування доцільності зрошення

Сформулювати висновок щодо впровадження або розвитку зрошення.

Контрольні запитання

1. Які чинники формують водний баланс території?
2. Чому водний дефіцит може виникати навіть за достатньої кількості опадів?
3. Які джерела води є пріоритетними для зрошення у різних кліматичних зонах?

4. Як кліматична мінливість впливає на стабільність водозабезпечення?

5. У чому полягає аналітичний підхід до обґрунтування зрошення?

Список рекомендованих джерел

1. Водні ресурси України https://uk.wikipedia.org/wiki/Водні_ресурси_України. *Допоміжне джерело для загальної характеристики водних ресурсів.*

2. Зрошення. Вікіпедія. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Зрошення> *Для ознайомлення з термінологією та класифікаціями.*

3. Державне агентство водних ресурсів України <https://www.davr.gov.ua>. *Офіційні дані щодо водних ресурсів, басейнового управління та водного балансу.*

4. FAO AQUASTAT : Global Information System on Water and Agriculture. Rome : FAO. <https://www.fao.org/aquastat>. *Основне міжнародне джерело статистичних даних щодо водних ресурсів і зрошення.*

5. World Bank. Water in Agriculture. Washington, DC: World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/topic/waterinagriculture>. *Аналітичні матеріали з водного дефіциту, зрошення та управління водними ресурсами.*

Практична робота 2

Аналітична оцінка та вибір альтернативних джерел води для систем зрошення

Мета роботи: сформуванню вміння проводити порівняльний аналіз альтернативних джерел води та обґрунтовувати вибір оптимальної інженерної стратегії водозабезпечення території в умовах дефіциту традиційних водних ресурсів.

Завдання роботи:

- проаналізувати ресурсний потенціал альтернативних джерел води;
- виконати порівняльну оцінку технічних, економічних та екологічних характеристик;

- обґрунтувати вибір технології підготовки води;
- сформувати концепцію гібридної моделі водозабезпечення;
- оцінити ризики використання альтернативних джерел.

Теоретичні відомості

В умовах дефіциту традиційних водних ресурсів зрошувальне землеробство потребує залучення альтернативних джерел водопостачання. До таких джерел належать очищені стічні води, атмосферні опади, мінералізовані та дренажні води, а також технології штучного поповнення підземних вод.

Вибір альтернативного джерела базується на принципі «fit-for-purpose», відповідно до якого якість води повинна відповідати меті її використання.

Сучасні інженерні підходи передбачають впровадження гібридних моделей, які поєднують кілька джерел. Це дозволяє знизити антропогенне навантаження на природні екосистеми та підвищити стійкість систем зрошення до кліматичних змін.

Для інженера важливо оцінювати не лише об'єм ресурсу, а й енергоємність його видобутку та ризики довгострокового впливу на ґрунтове середовище.

Вихідні дані для виконання роботи.

Для аналізу використовується територія, обрана у практичній роботі 1. Дані щодо потенціалу та характеристик різних типів альтернативних джерел наведені у класифікації (табл. 4).

Порядок виконання роботи.

1. Аналіз та ідентифікація доступних джерел

Визначити перелік альтернативних джерел води, які є найбільш доступними для обраної території дослідження. Проаналізувати їх за критеріями стабільності, якості та енергоємності (табл. 5).

2. Обґрунтування технології підготовки та використання

Обґрунтувати вибір способу використання води (наприклад, краплинне зрошення чи підґрунтовий полив) залежно від обраного джерела та типу сільськогосподарських культур.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика альтернативних джерел води

Джерело	Технологічний потенціал	Ключове обмеження	Сфера застосування
Стічні води (Reuse)	стабільний річний об'єм, наявність поживних речовин	суворі санітарні норми, ризик мікробіологічного забруднення	технічні та кормові культури, енергетичні ліси
Опади (RWH)	висока якість (прісна вода), низька собівартість збору	висока сезонна мінливість, потреба в акумулюючих ємностях	локальне зрошення, тепличні господарства
Підземні (MAR)	можливість акумулювання надлишків води та тривалого зберігання	складність контролю якості підземних горизонтів	резервне водопостачання, багаторічні насадження
Природні (NbS)	використання природних ландшафтів для очищення та утримання вологи	потреба у значних площах під екосистеми	урбанізовані території, об'єкти ландшафтної архітектури

Таблиця 5

Порівняльна оцінка джерел води

Джерело	Стабільність	Якість	Енерго-ємність	Обмеження	Висновок

3. Формування концепції гібридної моделі

Запропонувати варіант поєднання традиційних (річкових чи підземних) та альтернативних джерел для оптимізації водного режиму території. Оцінити можливі інженерні та екологічні ризики такої моделі (табл. 6).

Оцінка ризиків використання альтернативних джерел

Вид ризику	Прояв ризику	Наслідки для системи/грунту	Заходи з мінімізації
Санітарно-екологічний			
Техніко-технологічний			
Економічний			

Контрольні запитання

1. У чому полягає перевага очищених стічних вод порівняно з річковими в умовах посухи?
2. Чому атмосферні опади є екологічно привабливим, але нестабільним джерелом води?
3. Які основні ризики виникають при використанні мінералізованих вод у зрошенні?
4. Як принцип «fit-for-purpose» дозволяє оптимізувати підготовку води?
5. Яка роль гібридних моделей у підвищенні стійкості систем зрошення?

Список рекомендованих джерел

1. FAO AQUASTAT – Global Information System on Water and Agriculture <https://www.fao.org/aquastat>. *Основна база даних для аналізу потенціалу повторного використання стічних вод (Reuse) та збору опадів у розрізі країн світу.*
2. UN-Water. The United Nations World Water Development Report 2023 <https://www.unwater.org>. *Аналітичні дані щодо глобальних стратегій впровадження альтернативних джерел та управління водним дефіцитом.*
3. UNESCO. Managing Aquifer Recharge (MAR): A Response to Climate Change <https://unesdoc.unesco.org>. *Технічне керівництво з використання технологій штучного поповнення підземних вод для боротьби з кліматичними змінами.*

4. European Environment Agency (EEA). Nature-Based Solutions in Europe <https://www.eea.europa.eu>. *Огляд природно-орієнтованих рішень (NbS) для затримання та очищення води в урбанізованих та аграрних територіях.*

5. Singapore Public Utilities Board (PUB). NEWater and Urban Water Management <https://www.pub.gov.sg>. *Детальний опис світового кейсу Сінгапуру щодо створення замкненого циклу водокористування в місті.*

6. Державне агентство водних ресурсів України. Національна доповідь про стан водних ресурсів <https://www.davr.gov.ua>. *Дані щодо обсягів стічних вод в Україні та можливостей їх повторного використання в регіонах.*

Практична робота 3

Оцінка доцільності використання зворотного осмосу та ризиків застосування мінералізованих вод у системах зрошення

Мета роботи: сформулювати у студентів уявлення про можливості та обмеження використання мінералізованих вод у системах зрошення; навчити аналітично оцінювати доцільність застосування зворотного осмосу як технології підготовки води з урахуванням агрономічних, інженерних та екологічних ризиків.

Завдання роботи:

- проаналізувати мінералізацію та електропровідність вихідної води як потенційного джерела зрошення;
- визначити агрономічні обмеження використання мінералізованої води без попередньої підготовки;
- аналітично оцінити наслідки застосування зворотного осмосу (утворення пермеату, концентрату, енергоємність процесу) без детального технічного проектування;
- оцінити придатність води після повного або часткового опріснення для зрошення;
- обґрунтувати вибір груп сільськогосподарських культур за рівнем солестійкості;

- запропонувати інженерні заходи щодо зниження ризиків деградації ґрунтів та управління концентратом;
- зробити аналітичний висновок щодо інженерної доцільності опріснення для обраної території.

Теоретичні відомості

Мінералізовані та солонуваті води є вагомим, але технічно складним ресурсом для зрошення. В умовах глобальних кліматичних змін та зростання водного дефіциту, коли понад 97% водних ресурсів планети є солоними, використання мінералізованих вод стає стратегічним інструментом адаптації аграрного сектору.

Ключовими інженерними та агрономічними показниками оцінки якості такої води є:

- загальна мінералізація (*TDS*);
- електропровідність (*EC*), яка безпосередньо пов'язана з ризиками осмотичного стресу рослин, зниження врожайності та деградації ґрунтів.

Використання води з високим рівнем мінералізації без спеціальних заходів управління (промивних поливів, дренажу) призводить до вторинного засолення та осолонцювання ґрунтів, що критично погіршує їхню структуру та родючість. Для запобігання цим процесам в інженерній практиці застосовують технології підготовки води, серед яких найбільш досконалою є зворотний осмос. Це мембранний метод, що дозволяє розділити вихідний потік на пермеат (очищена вода) та концентрат (розсіл із високим вмістом солей).

Водночас впровадження зворотного осмосу вимагає врахування високої енергоємності процесу та вирішення проблеми безпечної утилізації концентрату. Інженерна доцільність такого рішення оцінюється комплексно: через баланс між вартістю енергії, екологічними обмеженнями та потенційним приростом урожайності солестійких культур.

Вихідні дані для виконання роботи

Для виконання роботи використовується територія дослідження, обрана у практичній роботі 1.

Вихідні дані включають тип джерела, значення мінералізації та кліматичні умови. Для оцінки агрономічних обмежень використовується класифікація за показником *EC* (табл. 7).

Таблиця 7

Агрономічна класифікація зрошувальної води за показником *EC*

Електропровідність (<i>EC</i> , dS/m)	Ступінь обмеження	Наслідки та рекомендації
< 0,7	відсутні	безпечна для всіх культур та типів ґрунтів.
0,7 – 3,0	помірні	потребує промивного режиму; можливе пригнічення чутливих культур.
3,0 – 7,0	сильні	придатна лише для солестійких культур на добре дренованих ґрунтах.
> 7,0	критичні	непридатна для зрошення без попереднього опріснення.

Порядок виконання роботи

1. Аналіз якості вихідної води

Охарактеризувати тип джерела та проаналізувати рівень електропровідності води. Визначити ступінь агрономічних обмежень та зробити висновок щодо можливості використання води без підготовки (табл. 7).

2. Аналітична оцінка доцільності застосування зворотного осмосу

Обґрунтувати необхідність застосування зворотного осмосу. Дати оцінку енергоємності процесу та обмежень, пов'язаних з утилізацією розсолу.

3. Оцінка агрономічних ризиків і вибір груп культур

Визначити допустимі групи сільськогосподарських культур залежно від рівня солестійкості та порогу *EC* (табл. 8).

Класифікація культур за солестійкістю

Ступінь стійкості	Культури	Поріг ЕС (dS/m)
Висока	ячмінь, бавовник, цукровий буряк, люцерна	6 – 8
Середня	пшениця, овес, соняшник, томати	2 – 6
Низька	кукурудза, соя, квасоля, плодови дерева, полуниця	1 – 1,5

4. Аналіз інженерних заходів захисту ґрунтів і управління концентратом

Обґрунтувати необхідність дренажу та промивних поливів. Запропонувати способи управління концентратом (замкнені цикли, випаровування) з урахуванням територіальних обмежень.

5. Формування підсумкових висновків

Сформулювати висновки щодо агрономічної прийнятності мінералізованих вод та інженерної доцільності впровадження опріснення для обраної території.

Контрольні запитання

1. Чому електропровідність є ключовим індикатором для оцінки ризиків зрошення?
2. У чому полягає осмотичний механізм впливу солей на рослину?
3. Які інженерні обмеження існують для скидання розсолу у внутрішніх регіонах?
4. Як принцип «fit-for-purpose» застосовується при опрісненні для потреб агросектору?
5. За яких умов впровадження опріснення вважається доцільним?

Список рекомендованих джерел

1. FAO AQUASTAT – Global Information System on Water and Agriculture <https://www.fao.org/aquastat>. Відкрита

міжнародна база даних щодо водних ресурсів, якості води та зрошення.

2. FAO. Water Quality for Agriculture (Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1) <https://www.fao.org/3/T0234E/T0234E.pdf>. Базовий нормативно-методичний документ для оцінки електропровідності, мінералізації та агрономічних обмежень використання води.

3. International Desalination Association (IDA) <https://idadesal.org>. Оглядові матеріали з технологій зворотного осмосу, енергоємності опріснення та сучасних тенденцій галузі.

4. World Bank. Desalination Handbook for Planners <https://documents.worldbank.org>. Аналітичні матеріали щодо інженерних та економічних меж застосування опріснення у водному господарстві.

5. U.S. Bureau of Reclamation. Desalination and Water Purification Research Program <https://www.usbr.gov/research/dwpr>. Прикладні матеріали з мембранних технологій, зворотного осмосу та управління розсолами (у т.ч. ZLD).

6. USDA NRCS. Salinity Management <https://www.nrcs.usda.gov>. Практичні рекомендації з управління засоленням ґрунтів, дренажу та захисту агроландшафтів.

7. International Center for Biosaline Agriculture (ICBA) <https://www.icba.org>. Інформаційні ресурси щодо солестійких культур та агрономічних стратегій використання мінералізованих вод.

8. Державне агентство водних ресурсів України <https://www.davr.gov.ua>. Офіційні національні дані щодо водних ресурсів, зрошення та управління водокористуванням.

Практична робота 4

Оцінка можливості використання очищених стічних вод для поливу

Мета роботи: оволодіти методикою оцінювання можливості використання очищених стічних вод для зрошення; навчитися обґрунтовувати вибір технологічної схеми

доочищення води з урахуванням типу зрошення, вимог до якості поливної води та екологічної безпеки.

Завдання роботи:

- охарактеризувати джерело стічних вод та рівень їх попереднього очищення;
- проаналізувати якісні обмеження використання стічних вод для поливу;
- визначити вимоги до якості води залежно від типу зрошення;
- оцінити можливі екологічні ризики використання очищених стічних вод;
- сформулювати висновок щодо доцільності повторного використання води.

Теоретичні відомості

Очищені стічні води є стабільним альтернативним джерелом води для зрошення в умовах дефіциту природних ресурсів. Вони можуть використовуватися для поливу сільськогосподарських культур і зелених насаджень за умови дотримання принципу *fit-for-purpose*, тобто відповідності якості води обраному способу зрошення.

Основними обмеженнями при використанні стічних вод є наявність зважених речовин, органічне та біологічне навантаження, мікробіологічні ризики, а також загальна мінералізація.

Доочищення стічних вод є обов'язковим етапом їх підготовки, особливо для систем краплинного зрошення, де існує високий ризик кольматації (забивання) емітерів.

Вихідні дані для виконання роботи

Для виконання роботи використовуються умовні вихідні дані щодо характеристик стічних вод та запланованого типу зрошення (табл. 9).

Порядок виконання роботи

1. Аналіз джерела стічних вод

На основі заданих даних визначити походження стічних вод та рівень їх попереднього очищення. Окреслити основні групи

забруднювачів, які можуть обмежувати використання води для поливу.

Таблиця 9

Характеристика вихідних стічних вод

Показник	Умовне значення	Пояснення
Тип стічних вод	комунальні	господарсько-побутові стоки
Рівень очищення	вторинне (біологічне)	після очисних споруд
Загальна мінералізація (сухий залишок)	1,2–1,8 г/л	допустима для зрошення
Зважені речовини	помірні	потребують фільтрації
Мікробіологічні показники	потенційно небезпечні	потрібне знезараження
Наявність органічних речовин	підвищена	характерна для біологічно очищених стоків
Запланований тип зрошення	краплинне	підвищені вимоги до якості

2. Визначення вимог до якості води

Обґрунтувати критичні показники якості води залежно від обраного типу зрошення, використовуючи орієнтовні обмеження (табл. 10).

Таблиця 10

Основні вимоги до якості води залежно від типу зрошення

Тип зрошення	Основні обмеження
Дощування	мікробіологічна безпека, запах
Краплинне	зважені речовини, біоплівки
Підґрунтове	мінералізація, стабільність складу

3. Оцінка екологічних ризиків

Аналітично оцінити ризики забруднення ґрунтів, накопичення солей та впливу на підземні води. Запропонувати заходи мінімізації ризиків (контроль якості, обмеження культур).

4. Формування підсумкових висновків

Сформулювати висновки щодо техніко-екологічного обґрунтування доцільності використання стічних вод та прийнятого інженерного рішення.

Контрольні запитання

1. Чому очищені стічні води розглядаються як альтернативне джерело для зрошення?
2. Які показники якості води є критичними для експлуатації систем краплинного зрошення?
3. У чому полягає суть принципу «fit-for-purpose» у контексті водного ресайклінгу?
4. Які основні етапи включає технологія доочищення комунальних стоків?
5. Як мінімізувати ризик мікробіологічного забруднення продукції при дощуванні?

Список рекомендованих джерел

1. FAO. Water Reuse in Agriculture: Global Perspectives and Practices (2023) <https://www.fao.org/home/en> Сучасні практики використання очищених стоків.
2. UN-Water. Wastewater: From Waste to Resource (2024) <https://www.unwater.org/publications> Аналітичний звіт ООН, що розглядає стічні води як ресурс сталого водного менеджменту, включаючи повторне використання у сільському господарстві.
3. European Union. Regulation (EU) 2020/741 on minimum requirements for water reuse <https://eur-lex.europa.eu> Нормативний документ ЄС щодо мінімальних вимог до якості води при повторному використанні для зрошення.
4. International Water Association (IWA). Water Reuse and Recycling <https://iwa-network.org> Оглядів та науково-методичні матеріали щодо сучасних технологій доочищення, повторного

використання стічних вод та інтегрованого управління водними ресурсами.

5. USDA NRCS. Salinity Management <https://www.nrcs.usda.gov> *Практичні рекомендації з управління засоленням ґрунтів, оцінки ризиків при зрошенні мінералізованими та очищеними стічними водами.*

6. International Center for Biosaline Agriculture (ICBA) <https://www.icba.org> *Інформаційні ресурси щодо солесійких культур, агрономічних обмежень та стратегій використання води підвищеної мінералізації.*

7. Державне агентство водних ресурсів України <https://www.davr.gov.ua> *Офіційні національні дані щодо водних ресурсів, зрошення та управління водокористуванням в Україні.*

8. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України <https://mepr.gov.ua> *Нормативно-правові та аналітичні матеріали у сфері водних ресурсів, охорони довкілля та екологічної безпеки.*

Практична робота 5

Оцінка потенціалу збору атмосферних опадів та визначення об'єму резервуара для зрошення

Мета роботи: сформувати вміння оцінювати потенціал збору дощових вод та визначати орієнтовний об'єм резервуара для їх акумулювання з урахуванням кліматичних умов, типу водозбору та потреб системи зрошення.

Завдання роботи:

- проаналізувати кліматичні умови території (кількість і сезонність опадів);
- визначити тип водозбірної поверхні і коефіцієнт стоку;
- розрахувати орієнтовний потенціал збору атмосферних опадів;
- визначити необхідний об'єм резервуара для покриття потреб поливу;
- обґрунтувати конструктивне рішення щодо типу акумулюючої ємності;

- оцінити технічні та екологічні обмеження впровадження системи.

Теоретичні відомості

Збір атмосферних опадів (*Rainwater Harvesting, RWH*) – це сукупність інженерно-технічних заходів, спрямованих на перехоплення, акумулювання та зберігання атмосферних опадів із поверхонь водозбору (дахів, майданчиків) для їх подальшого цільового використання. Технологія *RWH* дозволяє трансформувати неконтрольований зливовий стік у керований ресурс, що знижує навантаження на мережі водовідведення та дефіцит прісної води.

Потенціал збору дощової води визначається за формулою

$$V=P \cdot A \cdot C, \quad (1)$$

де V – об'єм зібраної води, м³; P – кількість опадів за період, м; A – площа водозбору, м²; C – коефіцієнт стоку, що враховує втрати на випаровування та вбирання поверхнею.

Вихідні дані для виконання роботи

Для аналізу використовується територія дослідження з практичної роботи 1. Дані щодо кількості опадів та площ водозбору (дахи споруд, теплиці) збираються з метеорологічних та наукових джерел. Коефіцієнт стоку обирається залежно від типу поверхні (табл. 11).

Таблиця 11

Орієнтовні значення коефіцієнта стоку

Тип поверхні	Коефіцієнт стоку (C)
Металевий дах	0,85–0,95
Бетон	0,80–0,85
Асфальт	0,70–0,85
Ґрунт	0,20–0,40
Зелений дах	0,10–0,30

Порядок виконання роботи

1. Аналіз кліматичних умов території

Охарактеризувати кількість опадів та особливості їх розподілу. Розрахувати частку опадів, що припадає на вегетаційний період, та оцінити доцільність їх збору для потреб зрошення.

2. Визначення потенціалу збору води

Обрати коефіцієнт стоку (табл. 11) та розрахувати потенційний об'єм води, враховуючи площу водозбору та кількість опадів у вегетаційний період.

3. Обґрунтування об'єму резервуара

Зіставити отриманий об'єм води з потребами культур у поливі. Розрахувати мінімальну ємність резервуара для автономного поливу протягом критичного місяця вегетації.

4. Вибір типу акумулюючої споруди

Обґрунтувати вибір конструктивного рішення: наземні резервуари, підземні модульні системи або наливні водосховища.

5. Аналіз технічних обмежень

Оцінити необхідність фільтрації води для захисту від замулення та ризику біологічного обростання при тривалому зберіганні.

6. Формування підсумкових висновків

Сформулювати висновки щодо потенціалу заміщення традиційних ресурсів дощовою водою та обґрунтувати обраний тип ємності згідно з принципом «fit-for-purpose».

Контрольні запитання

1. Які три ключові фактори визначають потенціал збору дощової води?

2. Чому для металевого даху коефіцієнт стоку значно вищий, ніж для ґрунту?

3. У чому полягає перевага підземних резервуарів перед наземними?

4. Які методи первинної фільтрації є обов'язковими для систем *RWH*?

5. Як кліматична мінливість впливає на розрахунок об'єму акумулюючої ємності?

Список рекомендованих джерел

1. FAO AQUASTAT – Global Information System on Water and Agriculture <https://www.fao.org/aquastat> Статистичні дані щодо водних ресурсів, зрошення та кліматичних показників.

2. FAO. Water Quality for Agriculture (Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1) <https://www.fao.org/3/T0234E/T0234E.pdf> Базові рекомендації щодо якості води для зрошення.

3. UN-Water. World Water Development Reports <https://www.unwater.org/publications> Аналітичні матеріали щодо дефіциту води, управління водними ресурсами та адаптації до зміни клімату.

4. UNESCO. Rainwater Harvesting and Managed Aquifer Recharge <https://unesdoc.unesco.org> Матеріали щодо збору атмосферних опадів та акумулювання води.

5. European Environment Agency (EEA) <https://www.eea.europa.eu> Дані про кліматичні тенденції та адаптаційні заходи в Європі.

6. Державне агентство водних ресурсів України <https://www.davr.gov.ua> Національні дані щодо водних ресурсів та водокористування.

7. Український гідрометеорологічний центр <https://meteo.gov.ua> Дані щодо опадів і кліматичних показників території України.

Практична робота 6

Оцінка та обґрунтування систем мікрозрошення (краплинне та SDI)

Мета роботи: сформувати вміння обґрунтовувати вибір між поверхневим краплинним та підґрунтовим краплинним зрошенням (SDI) на основі ґрунтово-кліматичних умов; навчитися розраховувати базові параметри системи та оцінювати її водо-, енерго- та ґрунтозберігаючий ефекти.

Завдання роботи:

- проаналізувати природні та технічні умови впровадження мікрозрошення;
- обґрунтувати вибір системи (наземне краплинне або *SDI*);
- розрахувати добову потребу у водних ресурсах для обраної ділянки;
- визначити орієнтовну годинну витрату системи;
- оцінити водозберігаючий ефект у порівнянні з традиційним дощуванням;
- визначити інженерні ризики функціонування системи та запропонувати заходи щодо їх мінімізації.

Теоретичні відомості

Мікрозрошення передбачає локальну подачу води малими дозами безпосередньо в кореневу зону рослини, що дозволяє суттєво економити водні ресурси та оптимізувати живлення культур.

Підґрунтове краплинне зрошення (*Subsurface Drip Irrigation, SDI*) є інноваційним різновидом мікрозрошення, при якому поливні лінії розміщуються в ґрунті на глибині 20–40 см. Така конструкція дозволяє повністю мінімізувати випаровування з поверхні ґрунту, уникнути поверхневого стоку, знизити ризик розвитку грибкових захворювань рослин та забезпечити стабільний водний режим.

Важливим індикатором ефективності є коефіцієнт корисного використання води, який становить:

- дощування – 0,70;
- наземне краплинне зрошення – 0,92;
- підґрунтове краплинне зрошення (*SDI*) – 0,95.

Вихідні дані для виконання роботи

Вихідні параметри для розрахунку обираються згідно з варіантом (табл. 12).

Робочий час поливу для всіх варіантів приймається постійним $t = 10$ год/добу.

Вихідні параметри для розрахунку

Варіант	Площа (S), га	Культура	Тип ґрунту	Потреба (q), м ³ /га	Джерело води
1	1,0	томати	суглинок	35	річка
2	2,0	ягідник	супісок	25	свердловина
3	5,0	кукурудза	суглинок	40	канал
4	3,0	сад	суглинок	30	артезіанська
5	4,0	овочеві (капуста)	супісок	32	наливне водосховище
6	2,5	виноградник	суглинок	28	підземні води
7	6,0	соняшник	супісок	38	зрошувальний канал
8	1,5	полуниця	суглинок	22	очищені стічні води
9	3,5	картопля	супісок	34	шахтний колодязь
10	4,5	баштанні	суглинок	26	відкрита водойма

Порядок виконання роботи*1. Обґрунтування вибору системи*

Сформулювати та обґрунтувати інженерне рішення: наземне краплинне чи підґрунтове (SDI) зрошення. Навести аргументи з урахуванням типу ґрунту, специфіки культури та ризику водної ерозії.

2. Розрахунок добової потреби води

Визначити загальний об'єм води для щоденного поливу площі за формулою

$$V_{\text{доб}} = q \cdot S, \quad (2)$$

де $V_{\text{доб}}$ – добова потреба у воді, м³/добу; q – норма водоспоживання культури, м³/га; S – площа ділянки, га.

3. Визначення годинної витрати системи

Розрахувати продуктивність насосної станції, необхідну для забезпечення поливу за відведений час

$$Q = V_{\text{доб}} / t. \quad (3)$$

де Q – годинна витрата системи (продуктивність), м³/год; t – тривалість роботи системи за добу, год.

4. Оцінка водозберігаючого ефекту

Розрахувати загальний об'єм водозабору для дощування та обраної системи мікрозрошення за формулою

$$V_{\text{подачі}} = V_{\text{доб}} / K_{\text{еф}}. \quad (4)$$

$V_{\text{подачі}}$ – загальний об'єм водозабору з джерела, м³/добу; $K_{\text{еф}}$ – коефіцієнт корисного використання води (0,70 – для дощування; 0,92 або 0,95 – для мікрозрошення).

Порівняти результати та визначити відсоток економії води.

5. Аналіз інженерних ризиків

Описати заходи щодо запобігання кольматації емітерів, вrostання коренів (для SDI) та пошкодження ліній гризунами. Оцінити водо-, енерго- та ґрунтозберігаючий ефекти.

Контрольні запитання

1. У чому полягає головна інженерна різниця між наземним краплинним зрошенням та SDI?
2. Чому вузол фільтрації є критичним елементом системи мікрозрошення?
3. Як механічний склад ґрунту впливає на форму контуру зволоження?
4. Що таке кольматація емітерів та які її основні види ви знаєте?
5. Чому підґрунтове зрошення (SDI) вважається найбільш ґрунтозберігаючою технологією?

Список рекомендованих джерел

1. FAO. Localized irrigation systems: Planning, design, operation, and maintenance <https://www.fao.org>. *Базове міжнародне керівництво Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН з проєктування та експлуатації систем мікрозрошення.*

2. USDA NRCS. National Engineering Handbook: Microirrigation <https://www.nrcs.usda.gov>. *Детальні інженерні та практичні рекомендації Міністерства сільського господарства США щодо розрахунку краплинного та підгрунтового (SDI) зрошення, а також водопідготовки.*

3. Netafim. Subsurface Drip Irrigation (SDI) Guidelines <https://www.netafim.com>. *Технічні та агрономічні посібники щодо впровадження та обслуговування SDI-систем.*

4. International Water Management Institute (IWMI) <https://www.iwmi.cgiar.org>. *Глобальні дослідження, аналітика та публікації щодо водозберігаючих технологій, підвищення ефективності зрошення та фертигації.*

5. Державне агентство водних ресурсів України: офіційний вебсайт <https://www.davr.gov.ua>. *Офіційні національні дані щодо стану водних ресурсів, управління водокористуванням та розвитку зрошувальних систем в Україні.*

6. Міністерство аграрної політики та продовольства України <https://minagro.gov.ua>. *Нормативно-правові акти, державні програми та аналітичні матеріали щодо модернізації гідротехнічної меліорації та впровадження водозберігаючих технологій.*

Практична робота 7

Оцінка енергоефективності та ресурсозбереження в системах зрошення

Мета роботи: навчитися порівнювати енергоспоживання різних систем зрошення; опанувати методику розрахунку потужності насосного обладнання та обґрунтувати використання сонячної енергії для живлення іригаційних систем.

Завдання роботи:

- проаналізувати енергетичні характеристики обраної системи зрошення;
- розрахувати необхідну потужність насоса для забезпечення робочого тиску;
- оцінити річне споживання електроенергії та його вартість;
- розрахувати потенційну економію енергії при переході на низьконапірні технології;
- оцінити можливість та доцільність встановлення сонячної насосної станції;
- сформулювати висновки щодо інженерної ефективності модернізації.

Теоретичні відомості

Енергоефективність системи зрошення визначається обсягом енергії, витраченої на подачу 1 м³ води під необхідним тиском. Ключовим напрямком ресурсозбереження є перехід від традиційного дощування (3–5 бар) до мікрозрошення (1–2 бар), що дозволяє пропорційно знизити необхідну електричну потужність насосної станції.

Основна формула для розрахунку потужності насоса

$$N = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H}{3600 \cdot \eta}, \quad (5)$$

де N – потужність насосного агрегату, кВт; Q – витрата системи, м³/год; H – загальний напір, м, що складається з висоти підйому та робочого тиску; η – коефіцієнт корисної дії насосного агрегату (зазвичай 0,6–0,8).

Вихідні дані для виконання роботи

Витрата системи приймається за результатами практичної роботи 6. Геометрична висота підйому води $H_z=10$ м. Параметри систем для аналізу наведені в табл. 13.

Для розрахунків прийняти, що 1 бар дорівнює приблизно 10 метрам напору води.

Параметри систем для аналізу

Вариант	Система поливу	Робочий тиск, бар	Вартість 1 кВт-год, грн	Кількість годин за сезон
1	Дощування (спреї)	4,0	7,0	800
2	Краплинне наземне	1,5	7,0	1000
3	Підгрунтове (SDI)	1,0	7,0	1000
4	Низьконапірна крапля	0,8	7,0	1200
5	Дощування (ротори)	3,5	7,0	900
6	Мікроспринклерне	2,0	7,0	1100
7	Краплинне (компенсоване)	1,2	7,0	1050
8	Дощування (MP-ротатори)	2,8	7,0	950
9	Підгрунтове (лункове)	0,9	7,0	1150
10	Комбінована система	2,5	7,0	850

Порядок виконання роботи*1. Розрахунок загального напору*

Визначити загальний напір системи, що складається з геометричної висоти та робочого тиску

$$H = H_z + (P_p \cdot 10), \quad (6)$$

де H – загальний напір, м; H_z – висота підйому, м; P_p – робочий тиск, бар.

2. Визначення потужності насоса

Розрахуйте потужність за формулою (5), прийнявши ККД (η) = 0,7.

3. Розрахунок енергоспоживання та витрат

Визначити сезонне споживання енергії та її вартість

$$E = N \cdot T, \quad (7)$$

де E – сезонне споживання енергії, кВт-год; T – кількість годин роботи системи за сезон, кВт-год (див. табл. 13)

$$S = E \cdot C, \quad (8)$$

де S – сезонна вартість електроенергії, грн; C – тариф на електроенергію (згідно з табл. 13), грн/кВт-год.

4. Обґрунтування застосування сонячної енергії

Оцінити необхідну площу сонячних панелей. Прийняти, що 1 кВт встановленої потужності потребує 6–8 м² площі фотомодулів.

5. Оптимізація та Smart Irrigation

Описати вплив автоматизації на енергобаланс. Визначити економію коштів за умови, що Smart-системи скорочують час роботи насоса на 20%.

6. Формування підсумкових висновків

Зробити висновок щодо економічної доцільності переходу на низьконапірні системи та використання відновлюваних джерел енергії.

Контрольні запитання

1. Чому зниження робочого тиску на 1 бар вважається вагомим інженерним досягненням?
2. Як пов'язані між собою ККД насоса та загальна вартість експлуатації системи?
3. Які переваги сонячних насосних станцій у віддалених регіонах?
4. Як встановлення датчиків вологості ґрунту впливає на ресурс насосного обладнання?
5. Які технічні заходи дозволяють мінімізувати втрати напору в трубопроводах?

Список рекомендованих джерел

1. FAO. Solar powered irrigation systems (SPIS) <https://www.fao.org>. Базове керівництво Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН з проектування та оцінки рентабельності сонячних насосних станцій для зрошення.
2. IRENA (International Renewable Energy Agency). Solar Pumping for Irrigation: Improving Livelihoods and Sustainability

<https://www.irena.org>. Аналітичний звіт щодо світових тенденцій впровадження відновлюваних джерел енергії в аграрному секторі.

3. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України <https://sace.gov.ua>. Офіційна інформація про державні програми з енергозбереження та розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

4. Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП). <https://ep3.nuwm.edu.ua>. Збірник наукових праць та методичних рекомендацій щодо розрахунку насосних станцій, оптимізації водопостачання та енергозбереження в меліорації.

Практична робота 8

Передпроектний аналіз об'єкта та обґрунтування вибору системи ландшафтного зрошення

Мета роботи: навчитися проводити зонування ландшафтного об'єкта за типами водоспоживання, обирати відповідні типи зрошувачів та обґрунтувати інженерне рішення з урахуванням специфіки міського середовища.

Завдання роботи:

- провести типізацію насаджень на обраній ділянці (газон, квітники, кущі, дерева);
- виконати зонування території за режимами поливу;
- обґрунтувати вибір поливного обладнання для кожної зони (спреї, ротори, МР-ротатори, краплинна трубка);
- визначити джерело водопостачання та необхідні методи водопідготовки;
- оцінити потенційні інженерні ризики (вітрове навантаження, вандалізм, ризики підтоплення).

Теоретичні відомості.

Ландшафтне зрошення в міському середовищі вимагає високої точності подачі води для мінімізації втрат на мощення та доріжки. Основним інструментом сучасного інженера є зонування – групування рослин зі схожими потребами у воді в

окремі зони поливу. Це дозволяє уникнути перезволоження одних ділянок при недоливів інших.

Для забезпечення стабільної роботи системи в публічних місцях використовують антивандальне обладнання та інтелектуальні контролери, що враховують погодні умови в реальному часі. Вибір зрошувачів базується на геометрії ділянки: для великих газонів доцільні ротори, для складних форм – ротатори, а для квітників – краплинне зрошення.

Хід виконання роботи

1. Характеристика об'єкта

Обрати план ділянки (міський парк, прибудинкова територія ЖК або приватна садиба). Підготувати схему ділянки, вказати площу кожної категорії насаджень.

2. Зонування території

Розподілити територію на зони (А, Б, В, Г) залежно від потреби рослин у воді, типу ґрунту та експозиції (сонце/тінь).

3. Вибір поливного обладнання

Для кожної зони підібрати обладнання, спираючись на технічні характеристики сучасних іригаційних систем (табл. 14).

Таблиця 14

Інженерне обґрунтування вибору методу зрошення

№ з/п	Зона / тип рослин	Обраний метод зрошення	Технічне обґрунтування
1	Газон (відкриті ділянки >100 м ²)	Ротори (напр. Hunter PGP)	великий радіус (до 15 м), висока вітростійкість.
2	Квітники Міксбордери	краплинне зрошення	відсутність зволоження мощення, економія води до 40%.
3	Дерева у мощенні Лунки	SDI або баблери	спрямована подача до кореня, захист від вандалізму.
4	Складні форми Схили	MP-ротатори	низька швидкість опадів (запобігає ерозії ґрунту).

4. Інженерні обмеження та безпека

Обґрунтувати вибір антивандальних зрошувачів та визначити склад сенсорів (датчики дощу, вологості) для автоматизації системи.

5. Аналіз графіку поливу

Запропонувати оптимальне «вікно поливу» (Window of Irrigation), враховуючи години відвідування об'єкта людьми та пікові навантаження на водопровідну мережу.

Контрольні питання для захисту роботи:

1. Чому не можна об'єднувати газонні ротори та краплинну трубку в один сектор (зону) поливу?

2. Які переваги дає використання МР-ротаторів на ділянках зі схилом?

3. Як впливає вітер у міській забудові на вибір між дощуванням та краплинним поливом?

4. Які санітарні вимоги висуваються до води при використанні очищених стоків у парках?

5. У чому полягає перевага підґрунтового зрошення (SDI) для міських вулиць?

Список рекомендованих джерел

1. ДСТУ Б В.2.5-44:2010. Проектування, монтаж і експлуатація систем поливу. К. : Мінрегіонбуд України, 2010. *Основний нормативний документ, що визначає технічні вимоги до зрошувальних мереж в Україні.*

2. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів. К. : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. *Вимоги до інженерного облаштування та озеленення міських територій.*

3. Hunter Industries. Handbook of Technical Design and Installation. Professional Landscape Irrigation <https://www.hunterindustries.com>. *Технічне керівництво з гідравлічного розрахунку та підбору зрошувачів для ландшафтних об'єктів.*

4. Rain Bird. Landscape Irrigation Design Manual <https://www.rainbird.com>. *Практичний посібник з проектування систем автоматичного поливу, розрахунку втрат тиску та зонування територій.*

5. The Irrigation Association (IA). Turf and Landscape Irrigation Best Management Practices <https://www.irrigation.org>. *Міжнародний стандарт ефективного управління водними ресурсами в ландшафтному зрошенні.*

6. Netafim. Landscape & Turf Solutions: Technical Manual <https://www.netafim.com>. *Спеціалізоване інженерне керівництво з технологій підґрунтового (SDI) та краплинного зрошення в міському середовищі.*

7. Державне агентство водних ресурсів України <https://www.davr.gov.ua>. *Джерело актуальних даних щодо нормативів якості води та правил спеціального водокористування в Україні.*

8. FAO Water Reports № 29 Landscape and Urban Irrigation Management. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Глобальний огляд стратегій адаптації міського зрошення до умов кліматичних змін.*

Практична робота 9

Оцінка водоспоживання та енергоефективності інноваційних систем мікрозрошення в ландшафті

Мета роботи: навчитися розраховувати та порівнювати фактичні витрати води (брутто) та електроенергії для різних методів ландшафтного поливу; сформувані вміння обґрунтовувати вибір системи на основі показників екологічної та енергетичної ефективності.

Завдання роботи:

- розрахувати чисту добову та сезонну потребу у воді (нетто) для заданої ландшафтної ділянки;
- визначити фактичну витрату води (брутто) для трьох систем поливу (дощування, наземне краплинне, SDI);
- розрахувати обсяг безповоротних втрат води за сезон;

- визначити загальні енерговитрати на перекачування розрахункового об'єму води для кожної технології;
- сформулювати аналітичний висновок щодо доцільності впровадження інноваційних систем мікрозрошення.

Теоретичні відомості

Сучасний ландшафтний дизайн вимагає впровадження ресурсозберігаючих технологій. Підгрунтове краплинне зрошення (*SDI*) – інноваційний метод, де поливні лінії розташовані під шаром ґрунту, що дозволяє уникнути випаровування та впливу вітру.

Коефіцієнт корисного використання води (ККВ) для *SDI* становить 0,95, тоді як для дощування – 0,70. Енергоефективність системи прямо залежить від робочого тиску: перехід до мікрозрошення (низький тиск) дозволяє знизити потужність насосного обладнання та вуглецевий слід об'єкта.

Вихідні дані для виконання роботи

Вихідні параметри обираються згідно з варіантом (табл. 15).

Геометрична висота підйому води $H_z = 10$ м.

Тривалість поливного сезону $T = 150$ днів.

ККД насосного агрегату $\eta = 0,7$.

Таблиця 15

Вихідні параметри для розрахунку

Варіант	Площа ділянки, м ²	Тип насаджень	Добова потреба (<i>ETc</i>), мм/добу
1	250	Парковий газон	4,5
2	400	Міксбордер (квітник)	5,0
3	150	Спортивний газон	6,0
4	300	Живопліт та чагарники	4,0
5	500	Територія ЖК (газон)	4,8
6	200	Тіньовий сад	3,5
7	600	Міський сквер	5,2
8	100	Контейнерне озеленення	7,0
9	450	Дерева в мощенні	4,2
10	350	Екзотичні рослини	5,5

Порядок виконання роботи

1. Розрахунок потреби у воді нетто

Визначити сезонну потребу нетто (без урахування втрат) за формулою

$$V_{нт} = (S \cdot ETc \cdot 150) / 1000, \quad (9)$$

де $V_{нт}$ – сезонна потреба нетто, м³; S – площа, м²; ETc – середньодобова потреба, мм/добу; 150 – кількість днів поливу; 1000 – коефіцієнт переведення літрів у кубічні метри.

2. Розрахунок фактичної витрати брутто та втрат води

Розрахуйте реальний об'єм води для трьох типів систем, використовуючи коефіцієнт ефективності

$$V_{бр} = V_{нт} / K_{эф}, \quad (10)$$

де $V_{бр}$ – фактичний об'єм водозабору (брутто), м³; $V_{нт}$ – чиста сезонна потреба рослин (нетто), м³; $K_{эф}$ – коефіцієнт ефективності системи (0,70 – для дощування; 0,92 – для наземного краплинного; 0,95 – для SDI).

Обсяг безповоротних втрат (води, що випарувалася або пішла на поверхневий стік) обчислюється як різниця між брутто та нетто об'ємами

$$V_{бн} = V_{бр} - V_{нт}, \quad (11)$$

де $V_{бн}$ – сезонний обсяг безповоротних втрат води, м³.

3. Гідравлічний розрахунок напору

Загальний напір, який має забезпечити насос, складається з геометричної висоти та робочого тиску обладнання

$$H = H_z + (P_p \cdot 10), \quad (12)$$

де H – загальний напір насоса, м; H_z – геометрична висота підйому від джерела до ділянки, м; P_p – робочий тиск системи, бар; приймається з практичної роботи 7 або згідно з технічними характеристиками обраних зрошувачів (наприклад, 4,0 – для дощування; 1,5 – для наземної краплинної системи; 1,0 – для SDI).

4. Розрахунок сезонних енерговитрат

Визначити кількість електроенергії для кожної технології за формулою (враховуючи подачу всього сезонного об'єму бруто)

$$E = \frac{9.81 \cdot V_{бр} \cdot H}{3600 \cdot \eta}, \quad (13)$$

де E – сезонні витрати електроенергії, кВт; η – коефіцієнт корисної дії насосного агрегату (0,7).

5. Звітність та аналіз результатів.

Звести дані у порівняльну таблицю (табл. 16) та сформулювати аналітичний висновок.

Таблиця 16

Порівняльні показники ефективності систем ландшафтного зрошення

Показник	Одиниця виміру	Дощування	Наземне краплинне	Підгрунтове (SDI)
Коефіцієнт ефективності	-	0,70	0,92	0,95
Сезонна потреба нетто	м ³			
Фактичний водозабір бруто	м ³			
Обсяг безповоротних втрат	м ³			
Робочий тиск системи	бар	4,0	1,5	1,0
Загальний напір насоса	м			
Сезонні енерговитрати	кВт год			

Контрольні запитання

1. Чому SDI має найвищий коефіцієнт корисного використання води?

2. Як робочий тиск системи корелює з вуглецевим слідом ландшафтного об'єкта?

3. У чому полягає небезпека високих безповоротних втрат води для екології міст?
4. Чому мікрозрошення є оптимальним для інтеграції з IoT-сенсорами вологості?

Список рекомендованих джерел

1. FAO. Localized irrigation systems: Planning, design, operation, and maintenance. <https://www.fao.org>. *Фундаментальне керівництво для розрахунку коефіцієнтів ефективності та норм водоспоживання нетто/брутто для мікрозрошення.*
2. Netafim. Subsurface Drip Irrigation (SDI) Guidelines. <https://www.netafim.com>. *Технічні параметри SDI-систем: робочий тиск, специфікація ліній та методи мінімізації втрат на випаровування.*
3. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. <https://sae.gov.ua>. *Нормативна база щодо енергозбереження та методологія оцінки «вуглецевого сліду» при експлуатації насосного обладнання.*
4. Hunter Industries. Handbook of Technical Design and Installation: Professional Landscape Irrigation <https://www.hunterindustries.com>. *Технічне керівництво з гідравлічного розрахунку та енергоефективності іригаційних систем.*
5. The Irrigation Association (IA). Landscape Irrigation Auditor: Training Manual. <https://www.irrigation.org>. *Міжнародний стандарт проведення водного аудиту та оцінки ефективності використання водних ресурсів.*

Практична робота 10

Моделювання алгоритму адаптивного управління Smart-контролера на основі водного балансу (ET-control)

Мета роботи: навчитися моделювати роботу інтелектуальних систем зрошення на основі методу «водного балансу»; сформувати вміння визначати інженерний поріг автоматичного спрацювання системи з урахуванням кліматичних параметрів та гідрофізичних властивостей ґрунту.

Завдання роботи:

- розрахувати фактичне водоспоживання культури на основі метеоданих;
- визначити запаси загальної та легкодоступної вологи в кореневій зоні;
- виконати ітераційне моделювання дефіциту вологи в ґрунті протягом 5-денного періоду;
- визначити момент автоматичного спрацювання Smart-контролера та розрахувати поливну норму;
- провести порівняльний аналіз ефективності адаптивного алгоритму та традиційного циклічного поливу.

Теоретичні відомості

Адаптивні Smart-контролери з метеорологічним управлінням (ET-control) реалізують алгоритм, що базується на щоденному розрахунку водного балансу кореневмісного шару ґрунту. Робота алгоритму подібна до «чекової книжки»: опади та полив – це поповнення рахунку, а евапотранспірація – щоденні витрати.

Ключові параметри, якими оперує система:

- ET_0 (базова евапотранспірація) – випаровування еталонного газону (мм/добу), що розраховується метеостанцією.
- K_c (коефіцієнт культури) – поправочний індекс, що враховує біологічні особливості конкретної рослини.
- TAW (Total Available Water) – загальна корисна вологоємність ґрунту (мм на 1 метр глибини).
- RAW (Readily Available Water) або оптимальний діапазон вологоспоживання – легкодоступна волога (інженерний тригер/пори́г). Це об'єм води (y мм), який рослина може витратити без стресу. Щойно дефіцит вологи досягає показника RAW , контролер автоматично відкриває клапан.

Вихідні дані для виконання роботи

Глибина кореневої зони для всіх варіантів становить 0,3 м. Коефіцієнт допустимого виснаження MAD прийняти рівним 0,5 (50%). Початковий дефіцит на початок 1-го дня дорівнює 0 мм.

Вихідні параметри для моделювання наведені в таблиці 17.

Таблиця 17

Вихідні параметри для моделювання

Варіант	Культура (K_c)	ET_0 , мм/добу	Тип ґрунту (TAW , мм/м)	Ефективні опади, мм
1	Газон парковий (0,8)	5,0	Суглинок (150)	День 3: 4 мм
2	Чагарники (0,6)	6,0	Супісок (100)	День 2: 5 мм
3	Квітник (0,9)	4,5	Легкий суглинок (130)	День 4: 6 мм
4	Хвойні дерева (0,5)	5,5	Глина (180)	День 3: 3 мм
5	Спортивний газон (1,0)	5,2	Середній суглинок (140)	День 2: 4 мм
6	Тіньовий сад (0,7)	3,5	Чорнозем (160)	День 5: 8 мм
7	Міський парк (0,55)	5,8	Важкий суглинок (170)	День 4: 5 мм
8	Живопис (0,75)	4,8	Пилуватий суглинок (145)	День 1: 3 мм
9	Екзотичні рослини (0,95)	6,5	Піщаний ґрунт (80)	День 3: 2 мм
10	Дерева в мощенні (0,65)	5,4	Урбанозем (120)	День 2: 6 мм

Порядок виконання роботи*1. Розрахунок фактичної добової потреби культури*

Визначити обсяг води, який контролер щодня «списує» з балансу

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c. \quad (14)$$

2. Визначення порогу спрацювання контролера (RAW).

Розрахувати запас вологи в шарі 0,3 м та визначити тригер поливу

$$RAW = TAW \cdot H_{кор} \cdot MAD \quad (15)$$

де RAW – поріг дефіциту, при досягненні якого вмикається полив, мм.

3. Моделювання дефіциту вологи

Розрахувати дефіцит на кінець кожного дня за формулою

$$D_i = D_{i-1} + ET_c - P_{ef} \quad (16)$$

де D_i – дефіцит поточного дня; D_{i-1} – дефіцит попереднього дня; P_{ef} – опади. Якщо дефіцит стає < 0 , прийняти його рівним 0.

4. Визначення моменту та норми поливу

Встановити день, коли $D_i \geq RAW$. Розрахувати необхідну поливну норму (брутто), врахувавши ККВ системи ($K_{ef} = 0,92$).

5. Аналітичний висновок.

Порівняти адаптивне управління з жорстким графіком (таймером) та оцінити економію води завдяки врахуванню опадів.

Контрольні запитання

1. Чому Smart-контролеру важливо знати точну глибину кореневої системи?
2. Як показник «ефективний дощ» впливає на зміщення дати поливу?
3. Що фізично означає досягнення межі MAD для фізіології рослини?
4. Яка роль коефіцієнта K_c у перетворенні еталонної евапотранспірації у фактичну?

Список рекомендованих джерел

1. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration. Режим доступу: <https://www.fao.org>. Базова методика розрахунку ET_c для інженерних розрахунків.
2. Irrigation Association. Smart Water Application Technologies (SWAT). Режим доступу: <https://www.irrigation.org>. Міжнародні стандарти та протоколи тестування Smart-контролерів.

3. Rain Bird. Smart Control Technology: The Science of ET. <https://www.rainbird.com> *Інженерне обґрунтування застосування метеостанцій у ландшафтних системах.*

4. Hunter Industries. Solar Sync Sensor and ET Management. <https://www.hunterindustries.com>. *Технічна документація щодо використання сенсорів сонячної радіації в адаптивних алгоритмах.*

5. ДСТУ ISO 11545:2009. Сільськогосподарське зрошувальне обладнання <https://online.budstandart.com>. *Український стандарт, що регулює вимоги до точності подачі води системами автоматичного поливу.*

Практична робота 11

Інженерна інтерпретація цифрових даних вологості ґрунту та розрахунок порогів автоматизованого поливу

Мета роботи: навчитися аналізувати дані з цифрових сенсорів, розраховувати гідрологічні параметри ґрунту та визначати інженерні Set Points (точки установки) для систем Smart-зрошення.

Завдання роботи:

- проаналізувати вихідні дані цифрових датчиків щодо поточного водного статусу поля;
- визначити діапазон доступної вологи (AWC) для заданого типу ґрунту;
- обчислити критичний поріг вологості на основі допустимого виснаження (MAD), при якому система повинна автоматично розпочати полив;
- розрахувати необхідну норму поливу (нетто) для відновлення запасів вологи до ідеального стану;
- сформулювати інженерний висновок щодо потреби в іригації.

Теоретичні відомості

Сучасне управління зрошенням базується на безперервному моніторингу вологості ґрунту за допомогою цифрових сенсорів

(TDR, FDR). Для програмування автоматики інженер-гідротехнік оперує такими критичними точками:

Найменша вологоємність (*Field Capacity, FC*) – верхня межа (100% цільового запасу). Полив вище цієї межі призводить до втрат води на глибинну фільтрацію.

Вологість в'янення (*Permanent Wilting Point, PWP*) – це нижній поріг, при якому вода утримується в ґрунті з такою силою, що коріння не може її всмоктати. Рослина гине.

Доступна волога (*Available Water Capacity, AWC*) – це різниця між FC та PWP, об'єм води, який фактично може використати рослина.

Коефіцієнт допустимого виснаження (*Management Allowed Depletion, MAD*) – інженерний поріг (тригер), що зазвичай становить 30–50% від AWC. Полив вмикають, щойно запаси вологи виснажуються на величину MAD.

Для розрахунків використовуються залежності:

- діапазон доступної вологи

$$AWC = FC - PWP, \%; \quad (17)$$

- поріг початку поливу

$$W_{поч} = FC - AWC \cdot MAD, \%; \quad (18)$$

- норма поливу

$$m = \frac{FC - W_{пот}}{100} \cdot H_{рт} \cdot 10^4, \text{ мм}, \quad (19)$$

де $W_{пот}$ – поточна вологість, $H_{кор}$ – глибина кореневмісного шару, м.

Вихідні дані для виконання роботи

Глибина кореневої зони для всіх варіантів на момент розрахунку становить 0,4 м. 1 мм поливу прирівнюється до 10 м³/га.

Порядок виконання роботи

1. Аналіз гідрологічного стану ґрунту

Охарактеризувати тип ґрунту за варіантом та проаналізувати значення найменшої вологоємності (*FC*) та вологості в'янення (*PWP*). Розрахувати діапазон доступної вологи (*AWC*) та оцінити поточний вміст води у відсотках (табл. 18).

Таблиця 18

Вихідні дані цифрових сенсорів та гідрологічні параметри ґрунту

Вариант	Культура (чутливість)	MAD	Тип ґрунту	FC, %	PWP, %	Поточна вологість, %
1	Газон (середня)	0,50	Суглинок	26	13	18
2	Квіти (висока)	0,30	Легкий суглинок	22	10	19
3	Хвойні (низька)	0,60	Пісок	10	4	7
4	Овочі (висока)	0,35	Глина	36	21	32
5	Кущі (середня)	0,45	Супісок	16	7	11
6	Лохина (дуже висока)	0,25	Торф'яний субстрат	45	25	41
7	Яблуня (середня)	0,50	Важкий суглинок	30	16	21
8	Полуниця (висока)	0,30	Суглинок	25	12	22
9	Виноград (низька)	0,60	Кам'янистий (піщаний)	12	5	8
10	Томати (висока)	0,40	Чорнозем	32	18	25

2. Визначення інженерних порогів Smart-системи

Обґрунтувати вибір коефіцієнта допустимого виснаження (MAD) залежно від чутливості культури. Розрахувати поріг автоматичного ввімкнення поливу $W_{поч}$. Визначити, чи досягла поточна вологість $W_{пот}$ критичної відмітки.

3. Розрахунок норми відновлювального поливу

Обчислити дефіцит води відносно FC. Розрахувати поливну норму нетто в мм шару та перевести її фізичний об'єм у $m^3/га$ для всієї глибини кореневої зони $H_{кор}=0,4$ м.

4. Формування інженерного висновку

Сформулювати рекомендацію для оператора Smart-системи або алгоритму контролера щодо негайного старту зрошення або очікування наступного циклу моніторингу.

Список рекомендованих джерел:

1. FAO. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and drainage paper 56) <https://www.fao.org>. *Методика розрахунку водоспоживання культур, доступної вологи та порогів виснаження.*

2. Sentek Technologies. Soil Moisture Sensor Data Interpretation Guide. <https://sentektechnologies.com>. *Приклади аналізу графіків інфільтрації та визначення Field Capacity за даними датчиків.*

3. CropX / Sentek Technologies *Технології інтеграції даних сенсорів у системи підтримки прийняття рішень (DSS).*

4. Державне агентство водних ресурсів України <https://www.davr.gov.ua>. *Нормативні дані щодо режимів зрошення сільськогосподарських культур у різних ґрунтово-кліматичних зонах України.*

5. METER Group. Soil Moisture 101: Measurements and Methods. <https://www.metergroup.com>. *Технічний огляд методів вимірювання (TDR/FDR) та калібрування цифрових датчиків.*

Практична робота 12

Інженерна інтерпретація термальних знімків з БПЛА та створення карти-завдання для диференційованого зрошення

Мета роботи: сформувати вміння аналізувати дані дистанційного термального зондування; опанувати методику розрахунку індексу водного стресу культури (*CWSI*) та навчитися розробляти диференційовані карти-завдання (*Prescription Maps*) для систем точного зрошення *VRI*.

Завдання роботи:

- проаналізувати вихідні дані термальної зйомки поля, отримані з БПЛА;

- розрахувати індекс водного стресу культури (*CWSI*) для трьох характерних зон поля;
- розробити інженерний алгоритм коригування поливної норми залежно від рівня стресу;
- розрахувати диференційовані норми поливу (м³/га) для кожної зони управління;
- сформулювати висновок щодо ресурсозбереження та екологічної безпеки при застосуванні технології *VRI (Variable Rate Irrigation)*.

Теоретичні відомості

Основою прецизійного управління зрошенням є просторовий моніторинг температури рослинного покриву. Оскільки рослина, що транспірує воду, охолоджується, підвищення температури листка є першою ознакою нестачі вологи.

Для кількісної оцінки використовується Індекс водного стресу культури (*CWSI*)

$$CWSI = \frac{T_c - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (20)$$

де T_c – фактична температура крони рослини, °С; T_{wet} – температура еталонної рослини при максимальній транспірації, °С; T_{dry} – температура еталонної рослини при повній зупинці транспірації, °С.

Значення *CWSI* варіюються від 0 (немає стресу) до 1 (критичний стрес). На основі цих даних формується карта-завдання, яка вказує бортовому комп'ютеру дощувальної машини індивідуальну норму виліву для кожного сектора поля.

Вихідні дані для виконання роботи

Базова розрахункова норма поливу для всього поля – 250 м³/га. Дані калібрування термальної камери: $T_{wet} = 22^\circ\text{C}$; $T_{dry} = 32^\circ\text{C}$.

Результати термальної зйомки поля наведені в таблиці 19.

Таблиця 19

Результати термальної зйомки поля (температура T_c , °C)

Варіант	Культура	Зона 1 (низина)	Зона 2 (рівнина)	Зона 3 (пагорб)
1	Кукурудза	23	27	31
2	Соняшник	24	28	30
3	Соя	22,5	26,5	31,5
4	Пшениця (озима)	23,5	27,5	30,5
5	Картопля	23	26	29
6	Цукровий буряк	24	27	31
7	Люцерна	23	28	32
8	Овочева група	22,5	27	30
9	Виноград	25	28,5	31,5
10	Сад (яблуня)	24	27,5	30,5

Порядок виконання роботи

1. Розрахунок Індексу водного стресу (CWSI)

Використовуючи формулу та дані таблиці 19, розрахувати показник CWSI для трьох зон поля. Визначити ступінь стресу (низький, помірний, високий).

2. Формування інженерного алгоритму VRI

Застосувати логіку контролера:

- якщо $CWSI < 0,3$ – норма 50% від базової;
- якщо $CWSI = 0,3 \dots 0,7$ – норма 100%;
- якщо $CWSI > 0,7$ – норма 150%.

3. Створення карти-завдання

Розрахувати фінальні диференційовані норми поливу ($m^3/га$) для кожної зони.

4. Еколого-економічне обґрунтування

Сформулювати висновок: на скільки вдалося зменшити ризики підтоплення низин та втрати врожаю на пагорбах порівняно зі звичайним поливом.

Контрольні запитання

1. Чому температура рослини є точнішим індикатором потреби у воді, ніж вологість ґрунту в одній точці?
2. Які технічні обмеження існують для реалізації *VRI* на старих дощувальних машинах?
3. Як хмарність під час польоту БПЛА впливає на точність розрахунку *CWSI*?
4. Яку роль відіграють еталонні показники T_{wet} та T_{dry} у калібруванні термальної камери перед польотом?

Список рекомендованих джерел

1. Google Earth Engine (GEE). <https://earthengine.google.com>. Хмарна платформа для аналізу термальних супутникових даних.
2. Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu>. Доступ до термальних даних місії *Sentinel*.
3. FAO WaPOR. <https://wapor.apps.fao.org>. Моніторинг водної продуктивності на основі дистанційного зондування.
4. Valley Irrigation. *VRI Solutions Guide*. <https://www.valleyirrigation.com>. Технічне керівництво з впровадження *VRI* на широкозахватних машинах.
5. MicaSense / DJI Enterprise. *Thermal Imaging in Agriculture*. <https://www.dji.com>. Специфікації термальних камер БПЛА для іригаційного моніторингу.

Практична робота 13

Оцінка екологічних ризиків вторинного засолення ґрунтів та розрахунок промивної норми

Мета роботи: сформувати вміння оцінювати екологічні ризики вторинного засолення ґрунтів при зрошенні мінералізованими водами; опанувати інженерну методику розрахунку промивної частки та обґрунтовувати необхідність водовідвідних (дренажних) заходів для сталого управління агроландшафтом.

Завдання роботи:

- проаналізувати вихідні дані щодо мінералізації поливної води та солестійкості культури;
- розрахувати необхідну промивну частку для запобігання накопиченню солей у кореневій зоні;
- визначити загальну (брутто) поливну норму з урахуванням потреби на промивання;
- оцінити об'єм глибинної фільтрації (зворотних вод), що надійде до підземних горизонтів;
- сформулювати інженерні висновки щодо необхідності дренажу та ризику підтоплення.

Теоретичні відомості

Зрошення водою з підвищеною мінералізацією за відсутності природного відтоку призводить до вторинного засолення. Оскільки рослина споживає чисту воду, розчинені солі накопичуються в ґрунті.

Для підтримки сольового балансу необхідно забезпечити вимивання солей за межі кореневої зони шляхом подачі додаткового об'єму води – промивної частки (*Leaching Fraction, LF*). Цей об'єм розчиняє солі та фільтрується вглиб, тому його обов'язково має перехоплювати колекторно-дренажна мережа.

Базова формула для розрахунку (за методикою FAO)

$$LF = \frac{EC_{iw}}{5 \cdot EC_e - EC_{iw}}, \quad (21)$$

де EC_{iw} – електропровідність поливної води, дС/м; EC_e – поріг толерантності культури до засолення, при якому врожайність становить 100%, дС/м.

Вихідні дані для виконання роботи

Чиста сезонна потреба культури у воді (нетто) для всіх варіантів становить 3000 м³/га.

Вихідні параметри для розрахунку промивної норми наведені в таблиці 20.

Таблиця 20

Вихідні параметри для розрахунку промивної норми

Варіант	Сільськогосподарська культура	Поріг солестійкості EC_e , дС/м	Електропровідність води EC_{iw} , дС/м
1	Квасоля (чутлива)	1,0	1,2
2	Кукурудза	1,7	1,5
3	Пшениця	6,0	2,5
4	Ячмінь (стійкий)	8,0	3,2
5	Томати	2,5	1,8
6	Люцерна	2,0	1,6
7	Картопля	1,7	1,4
8	Виноград	1,5	2,0
9	Соняшник	4,8	2,2
10	Цукровий буряк	7,0	2,8

Порядок виконання роботи

1. Розрахунок промивної частки (LF)

На основі EC_{iw} та EC_e розрахувати частку води (у частках одиниці), яка повинна пройти крізь ґрунт для вимивання солей.

2. Розрахунок загальної поливної норми (брутто)

Визначити загальний обсяг водозабору з урахуванням промивного компонента

$$V_{бр} = V_{нт} / (1 - LF). \quad (22)$$

де $V_{бр}$ – фактичний обсяг водозабору (брутто), розрахований з урахуванням промивної частки, м³/га; $V_{нт}$ – чиста поливна норма (нетто), необхідна для покриття потреб рослини в евапотранспірації, м³/га; LF – промивна частка, частки одиниці.

3. *Оцінка об'єму дренажного стоку*
Розрахувати об'єм води, який піде на глибинну фільтрацію

$$V_{др} = V_{бр} - V_{нт}, \quad (23)$$

де $V_{др}$ – сезонний об'єм дренажного стоку (зворотних вод), що фільтрується за межі кореневої зони, м³/га.

4. *Еколого-інженерний висновок*

Оцінити навантаження на дренажну систему. Зробити висновок: чи зможе ґрунт самостійно відвести такий об'єм води, чи необхідно проектувати закритий горизонтальний дренаж для запобігання підтопленню.

Контрольні запитання

1. Чому при використанні краплинного зрошення ризик засолення вищий на межах зон зволоження?
2. Як високий рівень ґрунтових вод впливає на ефективність промивних поливів?
3. У чому полягає екологічна небезпека дренажних вод для річок та озер?
4. Як зміна методу поливу (наприклад, перехід від дощування до краплинного зрошення) впливає на величину промивної частки LF ?

Список рекомендованих джерел:

1. FAO. Water Quality for Agriculture (Paper 29 Rev. 1). <https://www.fao.org>. Базове керівництво з оцінки якості води та солестійкості.
2. USDA NRCS. Salinity Management and Drainage. <https://www.nrcs.usda.gov>. Практичні рекомендації з управління засоленням.
3. Державне агентство водних ресурсів України. <https://www.davr.gov.ua>. Моніторинг якості поливних та дренажних вод.

4. University of California. Agricultural Salinity and Drainage. <https://salinity.ucr.edu>. Методи розрахунку сольового балансу для посушливих регіонів.

5. Міністерство захисту довкілля України. <https://mepr.gov.ua>. Нормативи охорони підземних вод від забруднення.

Практична робота 14

Комплексна техніко-економічна та екологічна оцінка ефективності впровадження Smart-систем зрошення

Мета роботи: сформувати вміння проводити комплексну техніко-екологічну та економічну оцінку ефективності впровадження інноваційних систем зрошення; опанувати методику розрахунку економічної окупності інвестицій (*ROI*) та оцінки синергетичного ефекту в рамках концепції «вода–енергія–врожай».

Завдання роботи:

- проаналізувати вихідні дані щодо модернізації традиційної системи зрошення до рівня Smart-системи;
- розрахувати річну економію водних ресурсів та електроенергії;
- визначити додатковий дохід від підвищення врожайності завдяки точному управлінню водним режимом;
- розрахувати термін окупності інвестицій (*Payback Period*) та показник рентабельності (*ROI*);
- сформулювати комплексний інженерний висновок щодо доцільності проєкту.

Теоретичні відомості

Прийняття рішення щодо модернізації базується на концепції *Water-Energy Nexus*: кожна заощаджена крапля води автоматично означає заощаджені кіловат-години на її подачу. Ефективність Smart-систем формується за рахунок:

1. Зменшення ОРЕХ (операційних витрат): економія води (до 30%), енергії та добрив.

2. Збільшення доходів: підтримання оптимальної вологості гарантує максимальну врожайність.

3. Екологічної безпеки: запобігання засоленню та забрудненню ґрунтових вод.

Основні показники:

- *ROI* – відсоткове співвідношення чистого прибутку до суми інвестицій;

- термін окупності – час, за який інвестиції повернуться за рахунок економії та прибутку.

Вихідні дані для виконання роботи

Вартість 1 м³ води – 12 грн (включаючи подачу), вартість додаткової тонни врожаю – 8000 грн.

Порядок виконання роботи

1. Аналіз техніко-економічних показників проєкту

Охарактеризувати базовий стан системи зрошення до модернізації та проаналізувати вихідні параметри інноваційного обладнання (табл. 21). Визначити потенціал заощадження водних ресурсів відповідно до типу обраної культури та технології поливу.

Таблиця 21

Вихідні параметри проєкту модернізації (на 1 га)

Варі-ант	Вартість Smart-обладнання, грн	Початкова витрата води, м ³ /га	Очікувана економія води, %	Додатковий врожай, т/га
1	60 000	4500	25	1,2
2	55 000	3800	20	0,8
3	70 000	5000	30	1,5
4	45 000	3200	15	0,7
5	65 000	4200	22	1,1
6	58 000	3900	18	0,9
7	75 000	5500	35	1,8
8	52 000	3500	20	1,0
9	62 000	4400	25	1,3
10	48 000	3300	15	0,6

2. Розрахунок річного економічного ефекту

Обґрунтувати доцільність впровадження Smart-технологій через зниження операційних витрат. Розрахувати річну економію від зменшення водоспоживання та визначити додатковий прибуток від приросту врожайності, що досягається завдяки усуненню водного стресу рослин.

3. Оцінка інвестиційної привабливості та окупності

Розрахувати загальний річний економічний ефект та визначити термін окупності інвестицій у роках. Провести розрахунок показника рентабельності інвестицій (ROI) за формулою

$$ROI = \frac{E_{tot}}{C_{inv}} \cdot 100\%, \quad (24)$$

де ROI – рентабельність інвестицій, %; E_{tot} – загальний річний економічний ефект, грн; C_{inv} – сума початкових інвестицій у Smart-обладнання, грн.

4. Формування комплексного інженерного висновку

Дати аналітичну оцінку синергетичному ефекту від впровадження системи (взаємозв'язок економії води, енергії та підвищення врожайності). Сформулювати остаточне рішення щодо реалізації проекту модернізації з урахуванням екологічних переваг точного зрошення.

Контрольні запитання

1. Як автоматизація поливу впливає на термін служби насосного обладнання?
2. У чому полягає "прихована" економія на добривах при використанні Smart-систем?
3. Чому концепція Water-Energy Nexus є основою "зеленої" економіки в іригації?

Список рекомендованих джерел

1. World Bank. Water in Agriculture. <https://www.worldbank.org>. Аналітика інвестицій та Water-Energy Nexus.

2. FAO. The State of Food and Agriculture. <https://www.fao.org>. *Звіти щодо економіки водного господарства, інвестицій в іригацію та концепції Water-Energy Nexus.*

3. Міністерство аграрної політики України. <https://minagro.gov.ua>. *Державні програми грантової підтримки та кредитування модернізації меліоративних систем в Україні.*

4. Держенергоефективності України. <https://saee.gov.ua>. *Нормативна база та методичні рекомендації щодо оцінки енергоефективності інфраструктурних об'єктів.*

5. Smart Irrigation. ROI Calculator Guide. <https://www.smartirrigation.org>. *Практичні кейси окупності систем автоматизації.*

Самостійна робота

Мета самостійної роботи – закріплення теоретичних знань та розвиток навичок самостійного мислення, дослідження та творчого підходу до вирішення завдань.

Форми та завдання самостійної роботи:

- підготовка доповідей, рефератів, презентацій;
- проведення досліджень (збір даних, аналіз інформації, формулювання гіпотез).

Компетенції, що розвиваються під час самостійної роботи:

- здатність самостійно шукати необхідну інформацію;
- уміння застосовувати теоретичні знання для вирішення практичних завдань;
- навички самоорганізації, планування, аналізу, синтезу та критичного мислення;

- відповідальність за результати власної роботи;

- можливість проявити індивідуальність і креативність.

Система заохочення:

- підготовка самостійного реферату – до 10 балів;
- участь із доповіддю на конференції – до 15 балів;
- написання статті – до 20 балів.

Орієнтовна тематика для самостійного вивчення

1. Перспективи використання «сірої води» (Greywater) для ландшафтного зрошення: техніко-екологічне обґрунтування та міжнародні стандарти якості.
2. Еволюція мембранних технологій: порівняльний аналіз нанофільтрації та зворотного осмосу в аграрному секторі.
3. Децентралізовані системи збору опадів: архітектурна інтеграція резервуарів Rainwater Harvesting (RWH) у сучасну міську забудову.
4. Інноваційні методи управління розсолами після опріснення: технологія Zero Liquid Discharge (ZLD) як засіб захисту довкілля.
5. Використання штучного інтелекту та нейромереж для прогнозування евапотранспірації на основі локальних метеоданих.
6. IoT-екосистеми в іригації: архітектура бездротових сенсорних мереж для моніторингу вологості ґрунту в реальному часі.
7. Гіперспектральний аналіз та термальна зйомка з БПЛА як інструменти ранньої діагностики водного стресу рослин.
8. Використання хмарних платформ (наприклад, Google Earth Engine) для аналізу багаторічних трендів вегетації та водного дефіциту.
9. Концепція Water-Energy-Food Nexus: взаємозв'язок між економією води, енергоспоживанням та продовольчою безпекою в іригації.
10. Відновлювана енергетика в меліорації: досвід проектування та експлуатації сонячних насосних станцій.
11. Nature-Based Solutions (NbS): використання штучних водно-болотних угідь для природного очищення поливної води.
12. Вуглецевий слід іригаційних систем: оцінка викидів CO₂ при переході до низьконапірних технологій зрошення.
13. Ксерискейпінг (Xeriscaping): принципи створення міських ландшафтів, що потребують мінімального поливу.

14. Специфіка інженерних рішень для автоматизованого зрошення «зелених стін» та вертикальних садів.

15. Антивандальні системи та інтелектуальні контролери в публічних міських просторах: інтеграція в систему «Smart City».

16. Вторинне засолення ґрунтів в умовах кліматичних змін: моделювання сольового режиму та прогнозування ефективності дренажу.

17. Економіка замкнутого циклу (Circular Economy) у водному господарстві: перехід від водовідведення до водного ресайклінгу.

18. Цифрові двійники (Digital Twins) зрошувальних систем: створення віртуальних моделей для симуляції гідравлічних процесів та оптимізації водоподачі.

19. Фітомоніторинг та датчики сокоруху: використання контактних сенсорів на рослинах як прямий метод визначення потреби у воді.

20. Біохімічні ризики при ресайклінгу води: аналіз впливу залишкових концентрацій фармацевтичних препаратів та мікропластику при використанні стічних вод для поливу.