

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО

**Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій**

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

„ ” 2026 р.
число місяць рік

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

„ ” 2026 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **„ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЖИВИЛЬНІ
РОЗЧИНИ ПРИ ВИРОЩУВАННІ РОСЛИН В ТЕПЛИЦЯХ ЗА
ТЕХНОЛОГІЄЮ NFT”**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Синявський О.Ю.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Мигович В.С.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій
К.Т.Н., доцент /ОКУШКО О.В./
(підпис)
« » 2024 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ
Миговичу Вадиму Сергійовичу

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи роботи: „Дослідження впливу магнітного поля на живильні розчини при вирощуванні рослин в теплицях за технологією NFT ”

затверджена наказом ректора НУБіП України від 18.11.2024 № 2058”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 25. 05 . 2026

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

«Правила улаштування електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз літературних джерел, присвячених магнітній активації водних розчинів.

2. Обґрунтувати спосіб індикації ефекту магнітної обробки водних розчинів.

3.Провести теоретичні і експериментальні дослідження зміни параметрів води і розчинів мінеральних добрив при магнітній обробці.

4.Провести дослідження впливу магнітної обробки живильного розчину на ріст і розвиток рослин.

5.Обґрунтувати параметри пристрою для магнітної обробки живильного розчину.

6.Розробити і провести дослідження системи автоматичного керування магнітною обробкою живильного розчину в теплиці.

Дата видачі завдання 19.11.2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи Синявський О.Ю.
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання Мигович В.С.
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 85 с., 15 рис., 9 табл., 21 джерело.

Об'єкт досліджень – процес магнітної обробки водних розчинів.

Предмет досліджень – режими магнітної обробки живильних розчинів у теплицях та параметри відповідного електрообладнання

Методи дослідження включають математичне моделювання, методи математичної статистики, елементи теорії планування експерименту та інші сучасні наукові підходи до обробки результатів. Експериментальна частина виконувалась із використанням вимірювальної апаратури: рН-метра рН-150МА, іоніміра И-160М, тесламетрів, амперметрів та вольтметрів, що дозволило контролювати електрофізичні параметри процесу з достатньою точністю.

Проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку овочівництва закритого ґрунту, визначено основні тенденції вдосконалення технологічних процесів і напрямки впровадження електротехнологій у тепличному господарстві. Додатково розглянуто світовий досвід застосування фізичних методів впливу на живильні середовища рослин.

Виконано комплекс теоретичних і експериментальних досліджень щодо зміни параметрів поливної води та живильних розчинів під впливом магнітної обробки. Встановлено оптимальні режими обробки, за яких досягається найбільш стабільний позитивний ефект. Досліджено вплив магнітної обробки води на фізіологічні процеси рослин, їх ріст, розвиток та формування врожайності овочевих культур.

Обґрунтовано конструктивні та електричні параметри пристроїв для магнітної обробки живильних розчинів із використанням електромагнітних систем, а також проведено їх експериментальне випробування. Розроблено систему автоматичного керування процесом магнітної обробки, що забезпечує стабільність параметрів впливу та підвищує ефективність технології. Наведено техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування електротехнологій у тепличному овочівництві.

Галузь застосування – сільське господарство.

Ключові слова: живильні розчини, магнітна обробка, магнітне поле, магнітна індукція, градієнт магнітного поля, швидкість руху живильного розчину, , тепличне овочівництво, підвищення врожайності.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ В ОВОЧІВНИЦТВІ ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ	11
1.1 Аналіз стану і перспективи розвитку овочівництва закритого ґрунту.....	11
1.2 Основні тенденції розвитку технологій вирощування овочів у спорудах захищеного ґрунту і напрямки застосування електротехнологій	12
1.3. Магнітна обробка поливної води і розчинів мінеральних добрив	19
1.4 Електрифікація і автоматизація технологічних процесів у теплиці з малооб’ємною гідропонікою.....	24
1.4.1 Регулювання мікроклімату у теплиці.....	24
1.4.2 Освітлення і опромінення рослин у теплицях.....	26
1.4.3 Вуглекислотне підживлення рослин у теплицях	28
1.4.4 Приготування і подача живильного розчину у теплицях	30
1.4.5 Електропостачання теплиць	31
1.5 Завдання досліджень	32
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
2.1 Програма досліджень	34
2.2 Методика досліджень.....	34
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ.....	42
РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ВОДИ ТА РОЗЧИНІВ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ ПРИ МАГНІТНІЙ ОБРОБЦІ.....	50
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНОГО РОЗЧИНУ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН	62

РОЗДІЛ 6 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ РОЗЧИНІВ І МЕТОДИКА ЇЇ РОЗРАХУНКІВ	66
РОЗДІЛ 7 РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ	71
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	81
ДОДАТКИ.....	83

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

A – коефіцієнт;
 a_{H^+} – активність іонів водню;
 B – магнітна індукція;
 C – концентрація речовини;
 d – діаметр;
 δ – повітряний зазор;
 E – потенціал;
 E_0 – стандартний потенціал;
 E_a – енергія активації;
 ε – енергія взаємодії;
 F – число Фарадея;
 f – коефіцієнт активності;
 G – критерій Кохрена;
 h – стала Планка;
 I – електричний струм;
 K – коефіцієнт швидкості;
 λ – довжина хвилі;
 m – маса іона;
 μ – магнітна проникність;
 ОВП – окислювально – відновний потенціал;
 P – потужність;
 R – універсальна газова стала;
 $R_{\text{п}}$ – магнітний опір повітряного зазору;
 R_c – магнітний опір феромагнітної ділянки;
 r – радіус;
 ρ – питомий електричний опір;
 q – заряд іона;
 S – площа;
 S_a – ентропія активації;
 S_0 – стандартна ентропія активації;
 S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;
 S_u^2 – дисперсія досліду;
 T – температура;
 t – час;
 U – напруга;
 v – швидкість руху;
 W – кількість витків;
 ϖ – швидкість хімічної реакції;
 Z – заряд іона.

ВСТУП

Овочівництво закритого ґрунту відіграє ключову роль у забезпеченні населення свіжими овочами протягом усього року, а також у виробництві якісної розсади для подальшого вирощування у відкритому ґрунті. Саме ця галузь є основою стабільного та прогнозованого виробництва овочевої продукції в умовах інтенсивного землеробства.

Разом із тим тепличне виробництво належить до найбільш енергоємних напрямів сільського господарства. Підвищення його ефективності можливе за рахунок впровадження енерго- та ресурсозберігаючих технологій малооб'ємного вирощування, які дозволяють істотно підвищити врожайність та покращити якісні показники продукції, зокрема вміст біологічно активних речовин і товарний вигляд овочів.

Застосування таких технологій потребує вирішення питань оптимізації мінерального живлення рослин, а також багаторазового використання поживних розчинів у замкнених системах. Одним із перспективних напрямів є впровадження електротехнологій, які забезпечують інтенсифікацію процесів засвоєння поживних речовин, підвищення ефективності використання води, мінеральних добрив та енергетичних ресурсів. У цьому контексті важливе місце займає технологія активації поливної води.

Для ефективного впровадження зазначених рішень у виробництво необхідно детально дослідити механізм впливу електромагнітного поля на воду та розчини мінеральних добрив, а також на фізіологічні процеси рослин. Крім того, слід визначити оптимальні режими обробки та обґрунтувати конструктивні параметри відповідного електротехнологічного обладнання з урахуванням умов тепличного виробництва.

Мета досліджень – обґрунтування режимів магнітної обробки живильних розчинів у теплицях та параметрів відповідного електрообладнання, що дозволить на 10-15% знизити витрати енергії, води та мінеральних добрив, підвищити урожайність овочевих культур та якість продукції.

Об'єктом досліджень є процес магнітної обробки водних розчинів.

Предмет досліджень – режими магнітної обробки живильних розчинів у теплицях та параметри відповідного електрообладнання.

Методи дослідження та використана апаратура включають математичне моделювання, методи математичної статистики, елементи теорії планування експерименту та інші сучасні підходи до аналізу експериментальних даних. У роботі застосовано рН-метр рН–150МА, іономір И–160М, тесламетри, амперметри та вольтметри для контролю електричних і фізико-хімічних параметрів процесу.

Теоретична цінність отриманих результатів полягає в отриманні аналітичних залежностей зміни параметрів живильних розчинів при магнітній обробці, які дали можливість визначити оптимальні параметри обробки, обґрунтуванні структури та параметрів системи автоматичного керування магнітною обробкою живильних розчинів.

Практична цінність отриманих результатів полягає у визначенні режимів магнітної обробки живильних розчинів у теплицях.

На захист магістерської роботи виносяться:

1. Аналітичні залежності зміни параметрів водних розчинів при магнітній обробці.
2. Режими обробки живильних розчинів при магнітній обробці.
3. Параметри електрообладнання для магнітної обробки живильних розчинів.
4. Структура та параметри системи автоматичного керування магнітною обробкою живильних розчинів.

У цій магістерській роботі проведений аналіз стану і перспектив розвитку овочівництва закритого ґрунту, проаналізовані тенденції розвитку технологій і напрямки застосування електротехнологій, проведені теоретичні і експериментальні дослідження зміни параметрів живильних розчинів при магнітній обробці і визначенні оптимальні параметри обробки, досліджений вплив магнітної обробки живильних розчинів на ріст, розвиток рослин та урожайність овочевих культур, обґрунтовані параметри і розроблена методика

розрахунку пристроїв для магнітної обробки живильних розчинів з електромагнітами та проведені їх дослідження, розроблена система автоматичного керування магнітною обробкою розчинів, наведені техніко-економічні показники застосування електротехнологій при вирощуванні овочів у теплицях.

Публікації. 1. Мигович В.С. Світлодіодна система опромінення рослин у теплицях. Тези доповідей 78-ої науково-практичної конференція студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м. Київ, 24 квітня 2025 р. С.51.

2. Мигович В.С. Резонансна система живлення світлодіодних тепличних опромінювачів. Тези доповідей 79-ої науково-практичної конференція студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м. Київ, 30 квітня 2026 р. С.111.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ В ОВОЧІВНИЦТВІ ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ

1.1 Аналіз стану і перспективи розвитку овочівництва закритого ґрунту

Овочівництво закритого ґрунту відіграє важливу роль у забезпеченні населення свіжими та вітамінізованими овочами в несезонний період, а також у виробництві якісної розсади для відкритого ґрунту. На сьогодні в Україні функціонує близько 3160 га захищеного ґрунту, з яких 563 га становлять зимові скляні теплиці та 2020 га — весняні плівкові теплиці. Понад 20 % площ зимових теплиць уже переобладнано для використання гідропонних технологій вирощування [1].

Обсяги виробництва овочів у закритому ґрунті становлять близько 250 тис. т, що відповідає приблизно 4 кг продукції на одну особу за умови рекомендованої норми споживання 13 кг. Це свідчить про значне відставання від потреб населення та від рівня розвинених країн, де тепличне виробництво є набагато інтенсивнішим. При цьому надходження продукції протягом року є нерівномірним: основна частка врожаю (60–80 %) припадає на весняний період (квітень–травень), що створює сезонні дисбаланси на ринку овочів.

Середні показники урожайності в тепличному господарстві залишаються відносно низькими: у зимових теплицях — близько 21,8 кг/м², у весняних — 5,7 кг/м², а в утепленому ґрунті — лише 2,8 кг/м². Крім того, не повністю використовується асортимент овочевих культур, а якість продукції часто не відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки через надмірне застосування пестицидів та недосконалість систем мінерального живлення.

Виробництво тепличної продукції характеризується високими витратами ресурсів: витрати енергії в зимових теплицях становлять 12–30 т умовного палива на 1 т продукції, витрати металу — 18–30 кг, мінеральних добрив — 1,5–2,5 кг/м². Затрати праці сягають 85–200 люд.-год на 1 т продукції. У результаті

техніко-економічні показники тепличного овочівництва в Україні у 2–4 рази поступаються рівню розвинених країн [2].

Для забезпечення нормативного рівня споживання овочевої продукції в несезонний період (13 кг на людину, у тому числі 5 кг томатів, 4 кг огірків і 4 кг зеленних культур) необхідно щорічно виробляти близько 650 тис. т овочів. При цьому планові рівні урожайності у зимових теплицях повинні становити близько 30 кг/м² для огірків, 20 кг/м² для томатів та 5 кг/м² для зеленних культур [2].

Основним напрямом підвищення ефективності тепличного овочівництва є перехід до енерго- та ресурсозберігаючих технологій виробництва. За існуючих технологічних підходів забезпечення навіть мінімальної норми споживання овочів потребувало б значних енергетичних потужностей у пікові періоди (до 15–17 млн кВт у березні), що становить приблизно третину встановлених енергетичних потужностей країни.

У комплексі заходів з енергозбереження важливе місце займають технології вирощування овочів із використанням малооб'ємних субстратів або безґрунтових систем живлення, а також впровадження автоматизованих систем керування мікрокліматом і мінеральним живленням рослин. Перспективним напрямом є також застосування електротехнологій, що дозволяють підвищити ефективність виробництва та знизити ресурсні витрати [2].

1.2 Основні тенденції розвитку технологій вирощування овочів у спорудах захищеного ґрунту і напрямки застосування електротехнологій

Нині в Україні найбільшого поширення набули технології вирощування овочевих культур як у ґрунтових теплицях, так і з використанням гідропонних методів на субстратах неорганічного та змішаного походження. При цьому саме гідропонні технології поступово займають провідні позиції у сучасному тепличному виробництві.

Гідропонні системи мають низку суттєвих переваг у порівнянні з традиційним ґрунтовим вирощуванням овочів. Зокрема, вони забезпечують більш ефективне використання площ закритого ґрунту за рахунок скорочення

вегетаційного періоду та прискорення плодоношення рослин. Крім того, підвищується врожайність і якість продукції завдяки точному регулюванню складу живильного розчину та режимів підживлення. Також зменшуються витрати води, мінеральних добрив і теплової енергії, практично відсутні бур'яни, значно знижується ураження рослин шкідниками та хворобами. У результаті зменшуються трудові витрати та собівартість продукції, а також створюються умови для комплексної механізації й автоматизації основних технологічних процесів [3, 4].

Сучасні методи гідропоніки умовно поділяють на три основні групи: субстратна культура, водна культура та аеропоніка [5, 6]. Кожен із цих напрямів відрізняється способом утримання кореневої системи та подачею поживного середовища, що визначає особливості їх застосування у промисловому тепличному виробництві.

Останні роки наукові дослідження були спрямовані на розробку економічно доцільних варіантів гідропоніки, які реалізуються через використання малооб'ємних систем вирощування рослин у жолобах, плівкових лотках, контейнерах, мінераловатних матах та інших конструкціях. У країнах Скандинавії та Великобританії за такими технологіями вирощується понад 80 % тепличних овочів [1], у Франції — близько 90 % [7], тоді як у Нідерландах тепличне овочівництво повністю перейшло на малооб'ємну гідропоніку [8]. У Японії такі технології застосовуються на площі понад 300 га [9], у Бельгії — близько 700 га [10], у Болгарії — близько 50 га [11], що свідчить про їх широке впровадження у світовій практиці.

Серед малооб'ємних технологій найбільшого поширення набули системи вирощування рослин на субстратах (торф, мінеральна вата, цеоліти) із застосуванням краплинного зрошення, а також тонкошарова проточна культура NFT (рис. 1.1). Ці технології забезпечують стабільне живлення рослин та високу ефективність використання ресурсів.

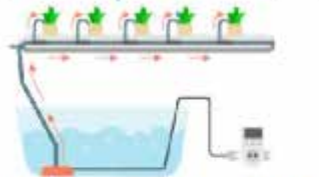
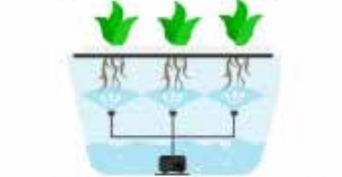
«Система капельного поливу»	«Nutrient Film Technique» (N.F.T.) техніка живильного шару	«Аeropоніка»
		
Плюси: з використанням таймера у реверсивній системі подача необхідної кількості води та контроль рівня рН відбувається одночасно та автоматично. Корені знаходяться у добре аерованому середовищі. Мінуси: вимагає профілактичної чистки системи, щоб уникнути появи засмічень та плісняви у прикореневій зоні та резервуарах.	Плюси: Не використовується субстрат, це зменшує загальні витрати на нього при вирощуванні культур. Вологе повітря у достатній кількості насичує коріння, що позитивно впливає на ріст надземної частини. Мінуси: пошкодження насоса або виникнення електроенергії повністю унеможливує роботу системи, коріння швидко висихає.	Плюси: дана система максимально збагачує коріння рослин киснем, водою та поживними речовинами, що є рушійною силою пришвидшеного темпу росту рослин. Мінуси: багато уваги треба приділяти роботі таймера, що регулює подачу води. Для розсіювання поживної речовини використовуються форсунки які схильні до частого засмічення.

Рис. 1.1. Технології гідропонного вирощування рослин [4]

Гідропонні установки широко застосовуються для вирощування розсади овочевих і декоративних культур, квітів, лікарських рослин, суниці, а також для отримання зеленої вітамінної маси для годівлі тварин. Крім того, вони використовуються при культивуванні окремих видів нижчих рослин, що мають промислове або біотехнологічне значення.

Вирощування рослин методом гідропоніки здійснюється як у тепличних умовах (теплична гідропоніка), так і у відкритих або тимчасово захищених спорудах із використанням легких плівкових укриттів (відкрита гідропоніка). Окремий розвиток отримали багаторусні гідропонні установки, які використовуються для виробництва зелених кормів, розсади та вигонки цибулі. Також у практиці застосовуються баштові та конвеєрні типи теплиць, що забезпечують інтенсивне використання площі.

Останніми роками значного поширення набули малооб'ємні гідропонні системи, у яких на одну рослину припадає приблизно 5–15 л субстрату. Як субстрати використовують верховий сфагновий торф зі ступенем розкладання до 10 % або мінераловатні плити. Такі матеріали укладають на поліетиленову плівку, попередньо розміщену на піщаній основі. Між шарами часто прокладають поліетиленові трубки для підігріву субстрату, що дозволяє стабілізувати температурний режим кореневої зони. Розсадні кубики

встановлюють безпосередньо на плити та накривають світлозахисною чорно-білою плівкою [5].

Живильні розчини для гідропонних систем готують на основі концентрованих розчинів мінеральних добрив типу А і Б, один з яких не містить сульфатів і фосфатів, а інший — кальцію. Додатково використовують 30–37 % азотну або ортофосфорну кислоту та воду. Концентровані розчини дозуються у воду у співвідношенні 1:100. Питома електропровідність розчину у субстраті підтримується на рівні 0,2–0,25 См/м для огірків і 0,25–0,3 См/м для томатів при температурі 25 °С, а кислотність становить рН 5,0–6,0. Контроль електропровідності та рН здійснюється 1–2 рази на тиждень портативними приладами, а повний хімічний аналіз проводять щомісяця [5].

Полив живильними розчинами виконується за допомогою автоматизованих систем краплинного зрошення, які забезпечують точну подачу води безпосередньо в кореневу зону рослин. Такий підхід дозволяє оптимізувати водно-повітряний і поживний режим субстрату, зменшити витрати води та добрив на 20–30 %, знизити захворюваність рослин і підвищити врожайність на 8–17 %.

Частота поливів регулюється залежно від рівня сонячної радіації або вологості субстрату. За програмного керування тривалість одного поливу становить 3–15 хв, тривалість циклу — близько 30 хв, пауза між циклами — приблизно 3 хв. Система може вмикатися від 5 до 20 разів на добу. На початкових етапах розвитку рослин полив виконується приблизно 5 разів по 2 хв, тоді як для дорослих рослин у літній період витрата розчину може досягати 5–6 л на одну рослину.

Застосування малооб'ємної гідропоніки із краплинним зрошенням дозволяє знизити витрати на будівництво інженерних конструкцій, однак втрати води та мінеральних добрив у таких системах можуть залишатися на рівні не менше 25 % [6].

У водній культурі коренева система рослин постійно перебуває у живильному розчині, що циркулює в системі. Це створює сприятливі умови для

розвитку коренів і забезпечує високий рівень урожайності. Разом із тим зменшуються витрати води, добрив та енергії, що підвищує екологічну доцільність технології. Основними недоліками є погіршення аерації кореневої зони та ризик розвитку патогенних мікроорганізмів у розчині, що потребує постійного контролю його складу, концентрації та рН.

Найбільшого поширення серед водних систем набула технологія тонкошарової проточної культури (NFT) [7] та система Ейн-Геді [8], які забезпечують стабільні умови живлення рослин і високу ефективність використання ресурсів.



Рис. 1.2. Вирощування рослин за технологією NFT [9]

У ряді господарств застосовується технологія вирощування рослин за методом водної культури в трубних системах з технологічними отворами. Живильний розчин у такі системи подається насосами зі збірної ємності протягом 4–5 хв, після чого відводиться назад, а рослини перебувають у періоді без розчину 30–40 хв, що дозволяє частково поліпшити аерацію кореневої зони.

При аеропонному способі вирощування коренева система розміщується у відкритому повітряному середовищі та періодично зволожується шляхом розпилення живильного розчину через форсунки. У порівнянні з водною культурою цей метод забезпечує значно краще насичення коренів киснем, однак вимагає високої надійності та безперебійної роботи обладнання, оскільки навіть короточасні збої можуть негативно вплинути на стан рослин.

Незважаючи на різноманітність конструктивних рішень гідропонних установок, їх спільною ознакою є вирощування рослин без ґрунту з використанням живильних розчинів, до складу яких висуваються чіткі вимоги щодо концентрації та стабільності параметрів.

Таким чином, розвиток гідропонних технологій спрямований на зменшення об'єму субстрату та перехід до систем багаторазового використання живильного розчину як у субстратних, так і у безсубстратних технологіях (водна культура, аеропоніка) [17, 20]. Це дозволяє знизити витрати води на 30 %, мінеральних добрив — на 40 %, теплової та електричної енергії — на 15–20 % (1,5–2,0 тис. Гкал/га), а також скоротити затрати праці до 149 тис. люд.-год. У результаті оптимізації мінерального живлення врожайність овочевих культур підвищується на 25–30 % [11].

Разом із цим виникає ряд актуальних завдань, які необхідно вирішити для подальшого розвитку технології:

Розробка систем поелементного контролю та регулювання складу живильного розчину з урахуванням малого об'єму субстрату на одну рослину [21].

Вирішення проблеми знезараження розчинів та боротьби з кореневими інфекціями [17].

Підвищення ефективності використання добрив і оптимізація мінерального живлення шляхом впровадження електротехнологічних методів [22].

Сучасне обладнання дозволяє автоматично підтримувати параметри мікроклімату в теплицях, а також готувати живильні розчини заданого складу з регулюванням рН та електропровідності. Проте контроль мінерального складу у

більшості господарств здійснюється переважно агрохімічними службами на основі періодичних лабораторних аналізів, що не забезпечує безперервного моніторингу стану живлення рослин.

При багаторазовому використанні живильного розчину його рН може змінюватися на 0,7–0,8 одиниці, а концентрація окремих елементів — до 60–90 % [6]. При цьому навіть відхилення вмісту окремого елемента на 30 % від оптимального рівня призводить до порушення засвоєння інших елементів і зниження врожайності та якості продукції [23].

Рослини засвоюють поживні речовини у вигляді іонів, що перебувають у дисоційованому стані. Перенесення елементів живлення в клітину здійснюється двома механізмами: пасивним транспортом за електрохімічним градієнтом та активним перенесенням проти нього. Оскільки іони мають електричний заряд, їх розподіл визначається як різницею потенціалів, так і концентраційними процесами (електрохімічний градієнт) [23].

Дослідження показують, що електричні явища відіграють значну роль у фізіології рослин. У відповідь на зовнішні подразники в рослин формуються слабкі електричні струми — біоструми, що свідчить про можливість впливу зовнішніх електричних полів на процеси росту та розвитку.

За даними Інституту фізіології рослин ім. К.А. Тімірязєва, інтенсивність фотосинтезу залежить від різниці потенціалів між рослиною та навколишнім середовищем: зі збільшенням цієї різниці фотосинтетична активність зростає, а при її зниженні процес поглинання CO_2 може пригнічуватися.

Експериментально встановлено, що пропускання електричного струму через рослини дозволяє регулювати процеси фотосинтезу та кореневого живлення. Американські дослідники відзначають, що кожен елемент живлення має оптимальні умови засвоєння при певних значеннях сили струму. Стимулюючий ефект спостерігається лише при підключенні негативного електрода, тоді як зміна полярності може пригнічувати ріст. Навіть малі струми (1 мкА для тютюну, близько 60 мкА для живців при укоріненні) здатні впливати на фізіологічні процеси рослин.

Окремі дослідження також підтверджують ефективність використання активованої води, обробленої магнітним полем, електричним струмом або термічними впливами (заморожування/розморожування). Така обробка сприяє підвищенню врожайності на 10–15 %, покращенню якості продукції та зменшенню витрат енергії на досвічування розсади на 4–5 кВт·год на одну рослину [25, 26].

1.3. Магнітна обробка поливної води і розчинів мінеральних добрив

Експериментальні дослідження показали, що магнітна обробка води призводить до помітних змін її фізико-хімічних властивостей. Зокрема, спостерігається інтенсифікація процесів коагуляції та адсорбції, зміна розчинності солей і газовмісту, а також модифікація умов кристалізації та змочування поверхонь. Додатково фіксуються зміни магнітної сприйнятливості, в'язкості, ступеня гідратації іонів та кінетики хімічних реакцій, що в сукупності впливає на поведінку водних систем.

Магнітна обробка водних розчинів також проявляє вплив на біологічні системи [22]:

- а) зміна структури води призводить до трансформацій у біологічних об'єктах, що перебувають у розчині;
- б) підвищується або змінюється проникність клітинних мембран, які забезпечують обмін речовин у живих системах;
- в) відбувається перебудова іонного складу водного середовища та ступеня гідратації окремих іонів;
- г) змінюються умови транспорту кисню до тканин організмів, що може впливати на їх фізіологічний стан.

Сучасні уявлення про механізм електромагнітної обробки водних систем перебувають на стадії формування та розвитку гіпотез. Умовно їх поділяють на три основні групи: «колоїдні», що пояснюють ефект впливом на колоїдні частинки з підвищеною магнітною сприйнятливістю; «іонні», які розглядають

взаємодію магнітного поля безпосередньо з іонами у розчині; та «водяні», що пов'язують ефекти з перебудовою структури самої води [27].

Фізична природа ефектів магнітної обробки пов'язується з дією сил Гуї та Лоренца. Сила Гуї впливає переважно на феромагнітні частинки, викликаючи їх переміщення та збурення навколишніх шарів рідини, що призводить до утворення мікротурбулентних потоків і інтенсифікації перемішування. Сила Лоренца діє на заряджені частинки та іони, змінюючи характер їх руху. У гетерогенних системах це спричиняє переміщення суспендованих частинок і газових бульбашок, а в гомогенних розчинах — зміну траєкторій руху іонів та формування їх обертального руху навколо силових ліній магнітного поля.

За наявності відносного руху рідини та магнітного поля виникає явище магнітофорезу — спрямований анізотропний рух іонів у розчині під дією сил Лоренца. Це призводить до зменшення середньої відстані між іонами та підвищення ймовірності їх взаємодії. Відповідно до положень теорії Арреніуса, швидкість утворення асоціатів іонів залежить від ступеня їх зближення та часу взаємного перебування в зоні контакту [28].

У гомогенних системах дія сили Лоренца також може викликати круговий рух іонів із певним радіусом, що визначається параметрами магнітного поля та властивостями розчину.

$$r = \frac{mv}{qB}, \quad (1.1)$$

де m — маса іона;

v — швидкість;

q — заряд іона;

B — магнітна індукція.

Якщо $l / 2\pi r < 1$, де l — шлях вільного пробігу іона, іони здійснюють неповний круговий рух та проходять через зону дії магнітного поля. При цьому їх траєкторія подовжується порівняно з умовами відсутності поля, що призводить до локального накопичення іонів у зоні магнітного впливу та прояву ефекту магнітної обробки.

Якщо $l / 2\pi r = 1$, то за час вільного пробігу кожний іон здійснює повний оберт по коловій траєкторії. У цьому випадку концентрація іонів у зоні дії магнітного поля практично не змінюється, і ефект магнітної обробки не проявляється. Відсутність ефекту також спостерігається при граничному випадку $l / 2\pi r = 0$.

При $l / 2\pi r \gg 1$ значно зростає кількість іонів, які виходять із структурного «каркасу» води, що спричиняє підвищення електропровідності розчину та зміну його іонного стану.

Таким чином, наявність або відсутність ефекту магнітної обробки та його напрям визначаються співвідношенням l / r , тобто залежать як від іонного складу розчину, так і від величини магнітної індукції. Різні поєднання цих факторів можуть давати протилежні результати, тому для кожного конкретного випадку необхідно підбирати оптимальні режими обробки.

При дослідженні магнітної обробки водних систем встановлено такі емпіричні закономірності:

1. У випадках, коли в системі не відбуваються незворотні зміни структури, ефект магнітної обробки після короточасного зростання поступово зменшується і зникає.
2. У багатьох експериментах спостерігається складна поліекстремальна залежність ефекту від параметрів магнітного поля (напруженості, градієнта та частоти). У деяких випадках фіксується навіть зворотний ефект.

В останні роки встановлено суттєвий вплив таких параметрів магнітного поля, як градієнт напруженості та частота. Дослідження цих факторів потребують подальшого уточнення та розвитку [22]. Можна припустити, що частота магнітного поля також істотно впливає на процес обробки водних систем: низькочастотні електромагнітні поля сильніше взаємодіють із системою, а ступінь впливу залежить від числа пар полюсів, геометрії апарата та швидкості руху потоку. Водночас вплив високочастотних полів досліджений недостатньо і потребує подальших експериментальних робіт.

Роль реверсу при магнітній обробці води полягає в періодичній зміні напрямку руху іонів, які під дією електромагнітодинамічних сил накопичуються біля стінок трубопроводу. При зміні напрямку поля або потоку ці іони переміщуються до протилежної стінки, що посилює їх взаємодію, сприяє перемішуванню системи та підвищує загальний ефект магнітної обробки.

У більшості досліджень встановлено такі закономірності:

Практично завжди існує оптимальна швидкість потоку, за якої ефект магнітної обробки є максимальним.

Ефективність магнітної обробки суттєво залежить від хімічного складу водної системи.

Найбільш виражений вплив електромагнітна обробка має на гетерогенні водні системи та процеси, пов'язані з фазовими переходами [22]. До таких процесів належать поверхневий натяг, адсорбція, розчинність, кристалізація, полімеризація, змочування, коагуляція, а також зміни при фазових переходах води, електрохімічні явища та іонний обмін.

Апаратні засоби для магнітної обробки водних систем поділяються на пристрої з постійними магнітами та електромагнітні системи (з внутрішнім або зовнішнім розміщенням магнітного кола). Перевагами апаратів на постійних магнітах є простота конструкції, відсутність потреби в електроживленні та можливість використання у вибухонебезпечних середовищах. Електромагнітні установки, у свою чергу, забезпечують можливість регулювання та отримання значно більших значень магнітної індукції.

Експериментально встановлено, що застосування імпульсних магнітних полів забезпечує більш виражений ефект обробки при однакових значеннях індукції, ніж у стаціонарних системах. У зв'язку з цим робочий діапазон індукцій може бути зменшений.

Оптимальні параметри магнітної обробки для більшості систем знаходяться в межах: магнітна індукція 0,04–0,2 Тл, швидкість потоку 0,5–2,5 м/с, кількість перемагнічувань 3–8 [28].

Важливою проблемою дослідження магнітної обробки є індикація її ефективності. Це питання на сьогодні опрацьоване недостатньо [27]. Основним завданням є створення безперервно діючого датчика, який дозволив би реалізувати систему автоматичного керування та підтримувати оптимальні режими роботи установок для різних типів розчинів. Перспективними напрямками вважаються методи контролю за зміною рН та електропровідності розчину [22].

У даний час магнітна обробка води найбільш широко застосовується для запобігання утворенню накипу в котельних установках [29]. Також відомі приклади її використання в сільському господарстві — для передпосівної обробки насіння, поливу рослин та меліорації ґрунтів.

При поливі магнітоактивованою водою спостерігається зниження лужності ґрунту, що сприяє переходу елементів живлення (азоту, фосфору, калію) у форми, доступні для рослин. Вміст цих елементів у рослинах підвищується на 10–15 %, а врожайність — на 15–20 % [22].

Дослідження М. Маркова (Софійський університет) показали, що при поливі томатів магнітоактивованою водою врожайність підвищується на 21 %, а вміст мінеральних солей у плодах збільшується на 10 %. Через 3 місяці спостерігалось зростання вмісту азоту та бору відповідно на 12 % і 24,6 % [22].

Експерименти Ергуна Ара з вирощування томатів у різних умовах ґрунту показали, що в родючому ґрунті рослини, политі магнітоактивованою водою, перевищували контрольні зразки за всіма показниками приблизно на 30 %. Дослідник пов'язує це з впливом магнітної обробки на кальцієвий баланс і засвоєння поживних речовин.

Згідно з публікацією в “Работническое дело” (№137, 17 травня 1982 р.), на площі 2700 м² спостерігалось прискорення дозрівання томатів на 26 % та підвищення врожайності з 150 до 230 ц/га (на 53 %). Також відзначалось збільшення вмісту вітаміну С, цукрів і сухих речовин у плодах.

За даними ВІЕСГ, застосування магнітної обробки води, субстратів і живильних розчинів дозволяє підвищити врожайність томатів на 10,1–22,4 %

[26]. Загалом використання магнітоактивованої води позитивно впливає на засвоєння поживних речовин, прискорює ріст рослин, підвищує врожайність, збільшує вміст мінеральних солей, цукрів і сухої речовини, а також проявляє фунгіцидні властивості, пригнічуючи розвиток фітопатогенних грибів [24].

Підвищення ефективності при магнітній обробці пов'язують із кількома ключовими факторами: збільшенням розчинності та засвоєння мінеральних добрив, дегазацією води з одночасним насиченням її киснем, а також підвищенням проникності біологічних мембран, що покращує транспорт поживних речовин у рослини.

Слід підкреслити, що підвищення ефективності використання мінеральних добрив є важливим державним завданням [22]. Навіть незначне зростання коефіцієнта їх засвоєння дозволяє отримати суттєву економію ресурсів і зниження витрат у сільськогосподарському виробництві.

1.4 Електрифікація і автоматизація технологічних процесів у теплиці з малооб'ємною гідропонікою

1.4.1 Регулювання мікроклімату у теплиці

Основними параметрами мікроклімату в тепличних умовах є температура та вологість повітря, газовий склад атмосфери, а також температура і вологість субстрату, які безпосередньо впливають на ріст і розвиток рослин.

Для забезпечення необхідних температурних умов у теплицях застосовують повітряно-водяне опалення. Джерелом тепла може виступати котельня установка, розташована на території тепличного комплексу, або централізована котельня. Теплоносій транспортується до споживачів через систему теплових мереж, які прокладаються у підземних каналах, безканалним способом або надземно на опорах залежно від умов експлуатації та проєктних рішень.

Система опалення теплиці включає кілька підсистем: опалення шатра, цокольне та торцеве опалення, а також систему надґрунтового обігріву. На ці складові припадає відповідно 80 %, 8 % і 15 % загальних витрат енергії, що визначає їх роль у загальному тепловому балансі об'єкта.

Вибір потужності та типу котельної установки здійснюється на основі розрахункового теплового навантаження тепличного комплексу, вимог до параметрів теплоносія, а також з урахуванням кліматичних умов району будівництва та структури теплового балансу.

Повітряний обігрів теплиць реалізується за допомогою повітряно-водяних калориферів типу АПВС, які розміщуються в шаховому порядку в торцевих зонах кожної секції. Усього в однокотлярній теплиці передбачається встановлення близько 22 калориферів.

Система вентиляції є природною і здійснюється через фрамуги, розташовані по коньку теплиці. Привід фрамуг виконується за допомогою багатооборотного виконавчого механізму МЕМТ-10 через рейковий механізм передачі зусилля.

Для формування оптимального вологісного режиму застосовується система дрібнодисперсного зволоження та випаровувального охолодження. Вона включає магістральні трубопроводи зі сталевих труб, колектори з оцинкованої сталі та зрошувачі з полімерних матеріалів, оснащені форсунками для розпилення води.

У тепличних комплексах впроваджуються автоматизовані системи регулювання (САР) параметрів мікроклімату, які забезпечують підтримання заданих умов вирощування рослин.

Регулювання температури повітря здійснюється автоматично шляхом керування системами опалення та вентиляції. Діапазон регулювання становить до 40 °С, а точність підтримання температури — ± 1 °С у всіх режимах роботи. Система компенсує вплив зовнішніх факторів за рахунок двокаскадного регулювання: перший каскад формує оптимальну температуру теплоносія

залежно від температури повітря та метеорологічних умов, другий — коригує відхилення температури повітря в кожній зоні теплиці.

Для теплиць із комбінованою системою опалення застосовується трикаскадна система регулювання, де третій каскад керує групами калориферів за допомогою позиційних регуляторів, забезпечуючи більш точне підтримання теплового режиму.

Регулювання вентиляції здійснюється з урахуванням зовнішніх метеорологічних параметрів. Система аналізує напрямок і швидкість вітру та автоматично визначає сторону відкривання фрамуг. При швидкості вітру понад 7 м/с відкривання фрамуг блокується для запобігання пошкодженню конструкцій. Додатково враховується рівень освітленості, що дозволяє адаптувати температурний режим до змін зовнішнього середовища.

Регулювання температури поливної води виконується пропорційними регуляторами в межах 5–35 °С з точністю ± 2 °С. Передбачено автоматичне скидання води при перевищенні температури понад 35 °С, а також світлову та звукову сигналізацію аварійних режимів.

Система адіабатичного зволоження повітря («Туман») використовується для захисту рослин від перегрівання. Вона вмикається за сигналом сонячного інтегратора залежно від сумарної сонячної радіації за певний проміжок часу. Тривалість роботи системи визначається автоматично або задається агрослужбою. Найбільш ефективною система є у весняно-осінній період, коли спостерігаються різкі коливання температури та інтенсивності сонячного випромінювання.

1.4.2 Освітлення і опромінення рослин у теплицях

У теплицях передбачається лише чергове освітлення проходів, яке виконується світильниками з люмінесцентними лампами типу 11ПВЛМ (2×40) у кількості 13 шт.

Світло є одним із ключових факторів зовнішнього середовища, що визначає інтенсивність процесу фотосинтезу та, відповідно, ріст і розвиток рослин. У зимовий період та ранньою весною природного освітлення недостатньо, а енергія природного світлового потоку є обмеженою. У зв'язку з цим застосовують штучне електричне досвічування, яке дозволяє скоротити період вирощування розсади на 25–30 днів і підвищити врожайність на 25–30 %.

Для опромінення розсади у розсадному відділенні використовуються опромінювальні установки з лампами ДРЛФ-400 (ОТ-400М), а також установки з металогалогенними лампами (УОРТ). Металогалогенні джерела світла характеризуються вищою світловою віддачею та підвищеним коефіцієнтом корисної дії, що забезпечує кращі умови фотосинтезу.

Останнім часом значного поширення набули світлодіодні (LED) системи опромінення. На основі математичного моделювання розроблено конструкцію світильника, що включає чотири групи світлодіодів із довжинами хвиль 400 нм, 470 нм, 525 нм та 600 нм із відповідним співвідношенням потужностей 3,2 % : 10,3 % : 16,1 % : 70,4 %.

Система світлодіодного опромінення включає ширококутові опромінювачі та багатоканальну резонансну систему живлення, яка забезпечує стабільність параметрів випромінювання та гнучке керування режимами освітлення.

Експериментальні дослідження показали, що біометричні показники салату та петрушки при природному освітленні в теплиці є приблизно у 1,5 раза нижчими, а у кропу — майже у 2 рази нижчими порівняно з рослинами, вирощеними із застосуванням світлодіодного опромінення.

Для зменшення кількості силових і керуючих проводів доцільно використовувати багатоканальну резонансну систему живлення, яка забезпечує ефективний розподіл енергії між випромінювачами.

Блок керування системою включає перетворювач частоти, який задає необхідний рівень опромінення в кожному каналі та забезпечує плавне вмикання

і вимикання світильників, що підвищує надійність роботи системи та зменшує пускові навантаження.

Передавальний перетворювач частоти містить випрямляч, задаючий генератор у діапазоні 4,0–12,0 кГц, попередній підсилювач потужності та вихідний підсилювач.

До перетворювача частоти підключається LC-контур, який є складовою частиною передавального резонансного трансформатора. До його вихідної обмотки приєднано лінію електропередачі, яка забезпечує передачу енергії до зворотного перетворювача напруги. На виході вторинного трансформатора встановлено випрямляч, до якого підключаються світлодіоди як кінцеві споживачі.

Заміна традиційної системи опромінення на базі ламп ДНаЗ на світлодіодну дозволяє отримати річний економічний ефект близько 416 тис. грн на один блок теплиці, а термін окупності нової системи становить приблизно 1,7 року.

1.4.3 Вуглекислотне підживлення рослин у теплицях

У типових проєктах блочних теплиць для підживлення рослин вуглекислим газом застосовуються системи з використанням генераторів типу УГ-6. Однак на практиці такі системи використовуються обмежено через низку суттєвих недоліків, які негативно впливають на мікроклімат теплиць та розвиток рослин.

По-перше, процес згоряння палива в генераторах CO_2 супроводжується виділенням значної кількості тепла, що призводить до перегріву повітря в теплиці. Це робить їх практично непридатними для роботи в періоди максимальної сонячної інсоляції, коли температура в теплицях і так досягає граничних значень, хоча саме в цей час потреба рослин у CO_2 є найбільшою.

По-друге, генератори вуглекислого газу можуть утворювати токсичні продукти згоряння, що створює потенційну небезпеку для обслуговуючого персоналу та вимагає додаткових заходів безпеки.

По-третє, при відкритих фрамугах теплиць перегрітий CO_2 швидко розсіюється в атмосфері, що значно знижує ефективність його використання. У результаті навіть при роботі генераторів концентрація вуглекислого газу в повітрі теплиці практично не досягає необхідного рівня.

З урахуванням зазначених недоліків для забезпечення стабільного та ефективного вуглекислотного живлення рослин протягом усього року доцільним є застосування комбінованих систем підживлення. Такі системи передбачають використання зрідженого CO_2 або утилізацію відхідних газів котельних установок залежно від режимів роботи тепличного комплексу та зовнішніх умов (рис. 1.3).

Для забезпечення тепличних комбінатів надійним вуглекислотним підживленням протягом усього року доцільно використання комбінованих схем з використанням при необхідності зрідженої вуглекислоти або відхідних газів котельних (рис.1.3.).

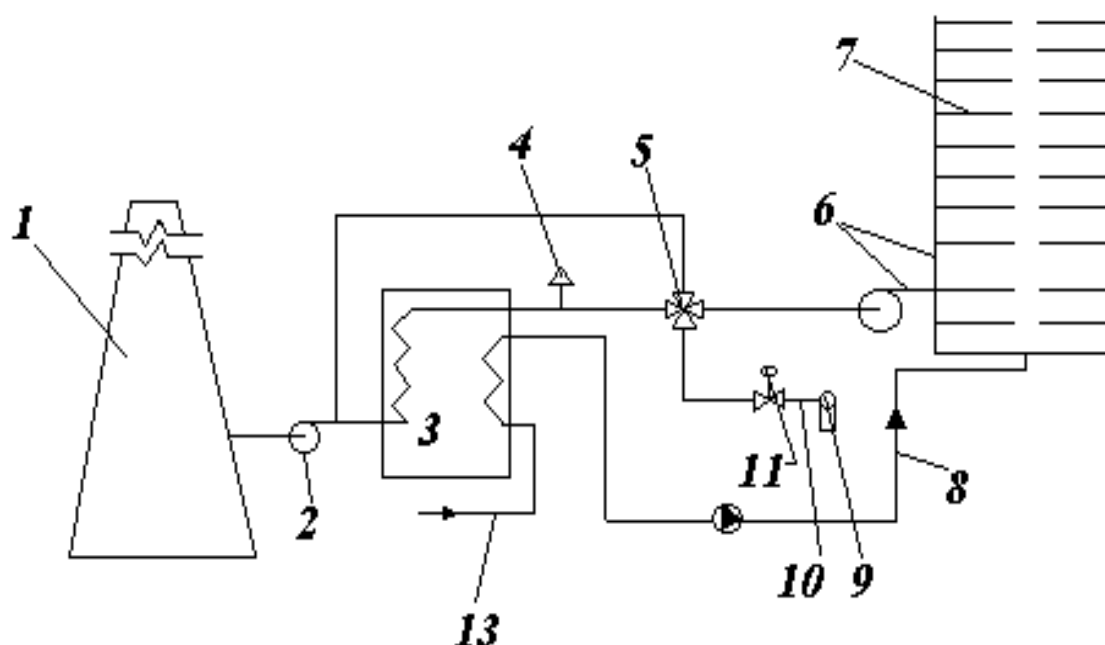


Рис.1.3. Технологічна схема використання відхідних газів котельних:

1 – димова труба; 2 – вентилятор; 3 – теплообмінник; 4 – скидний клапан; 5 – перемикаючий пристрій; 6 – магістральний трубопровід;

7 – перфорований роздавальний рукав; 8 – трубопровід системи обігріву теплиць; 9 – ізотермічна ємність; 10 – патрубок; 11 – електромагнітний клапан; 12 – насос; 13 – водопровід.

Початковий стан цього процесу – охолодження димових газів у водяному скрубєрі або економайзері. Нагріту при цьому воду можна використовувати як для поливу, так і для обігріву теплиць. Ця система вуглекислотного підживлення, як показав досвід експлуатації, надійна в роботі і проста для обслуговування.

1.4.4 Приготування і подача живильного розчину у теплицях

Живильний розчин готується у спеціалізованому вузлі приготування, який забезпечує автоматизоване змішування, дозування та подачу компонентів у тепличну систему. Вузол включає чотири ємності для концентрованих розчинів мінеральних добрив А і Б, причому склад компонентів у них розподілено за спеціальною схемою для запобігання випадання солей в осад. Окремо передбачено бак для кислоти, змішувальну камеру, а також насосне обладнання для подачі води і готового живильного розчину в теплиці.

Концентровані розчини добрив А і Б готуються в окремих змішувальних апаратах із мішалками, після чого подаються до вузла приготування живильного розчину для подальшого дозування. Вода з температурою 22–25 °С закачується насосом у накопичувальну ємність об'ємом 3 м³, де за сигналами датчика рівня підтримується стабільний запас. Далі вода насосом М9 через фільтр Ф1 і запірну арматуру (СВМ) подається у змішувальний бак об'ємом 1 м³.

Після заповнення основних ємностей вмикаються насоси М6 і М7, які забезпечують інтенсивне перемішування компонентів добрив до повного їх розчинення. Отриманий розчин через систему вентилів перекачується у баки зберігання, звідки використовується для подальшого приготування робочих сумішей.

На наступному етапі у змішувальний бак через вентиль СВМ повторно подається вода. При досягненні нижнього рівня вмикаються дозувальні насоси

М1–М3, які подають концентровані розчини мінеральних добрив і кислоти. Робота насосів-дозаторів добрив регулюється кондуктометричним датчиком, а дозування кислоти контролюється рН-метром, що забезпечує стабільні параметри живильного середовища.

При досягненні верхнього рівня у змішувальному баку вмикається насос М4, який подає готовий живильний розчин у тепличну систему (резервний насос М5 використовується як дублюючий елемент). Наявність протоку в системі контролюється реле протоку, а електроконтактний манометр забезпечує захист, вимикаючи насос у разі відсутності циркуляції.

Якість живильного розчину підтримується за параметрами: питома електропровідність 0,2–0,25 См/м при 25 °С для огірків і 0,25–0,3 См/м для томатів, при рівні кислотності рН 5,0–6,0.

1.4.5 Електропостачання теплиць

Електропостачання блоку теплиць здійснюється від щита станцій керування, який розміщений у приміщенні щитової. Живлення щита станцій керування виконується від трансформаторної підстанції по чотирьох окремих фідерних лініях, що підвищує надійність електропостачання та дозволяє рівномірно розподіляти навантаження між споживачами.

Усі електроспоживачі отримують живлення від щита станцій керування через силові кабельні лінії типу АНРГ. Групові мережі виконуються кабельними лініями з різними способами прокладання залежно від умов експлуатації: у щитовій — в кабельних каналах, у теплопункті — в металевих лотках і трубах, у з'єднувальному коридорі та безпосередньо в теплицях — у лотках, що забезпечує захист кабельних трас від механічних пошкоджень і вологи.

Мережі електроосвітлення живляться від окремих щитків, які встановлюються в коридорних зонах теплиць, а також у щитовій для забезпечення освітлення допоміжних приміщень. Така структура дозволяє здійснювати локальне керування освітленням та підвищує експлуатаційну зручність системи.

Розподіл електроенергії по групах опромінювачів розсади виконується за допомогою розподільчих пристроїв системи керування електродосвічуванням типу РУ-1, які забезпечують поетапне включення та регулювання режимів роботи. Керування цими пристроями здійснюється з центрального пульта, встановленого у щитовій.

Розподільчі мережі системи електродосвічування виконуються кабелем АНРГ, групові лінії — кабелем КРПТ, а кола керування — кабелем АКРНГ. Така диференціація кабельних ліній забезпечує надійність роботи, електромагнітну сумісність та зручність технічного обслуговування системи.

1.5 Завдання досліджень

Інтенсифікація овочівництва закритого ґрунту безпосередньо пов'язана з переходом до енерго- та ресурсозберігаючих технологій вирощування рослин, у тому числі із широким впровадженням електротехнологічних рішень.

Проведений аналіз літературних джерел щодо технологій вирощування рослин у спорудах захищеного ґрунту показав, що застосування електротехнологій, зокрема методів активації поливної води, а також автоматизованого контролю і регулювання іонного живлення рослин, сприяє підвищенню врожайності, покращенню якості продукції та зменшенню витрат мінеральних добрив і енергоресурсів. Водночас встановлено, що на сьогодні недостатньо дослідженим залишається механізм дії магнітного поля на зміну фізико-хімічних властивостей води та розчинів добрив, відсутні чіткі рекомендації щодо оптимальних режимів обробки, а також не обґрунтовані конструктивні параметри відповідного обладнання. Це зумовлює необхідність проведення додаткових теоретичних та експериментальних досліджень.

На основі аналізу стану питання та відповідно до поставленої мети визначено такі основні завдання досліджень:

- – обґрунтувати способи та технічні засоби контролю параметрів води і розчинів мінеральних добрив, а також методи індикації ефекту магнітної обробки;

- – дослідити вплив магнітного поля на зміну фізико-хімічних властивостей води та живильних розчинів;
- – дослідити вплив магнітної обробки на ріст, розвиток і продуктивність рослин;
- – обґрунтувати раціональні режими та конструктивні параметри установки для магнітної обробки води і розчинів добрив;
- – розробити експериментальні зразки обладнання для магнітної обробки та провести їх випробування з подальшим аналізом отриманих результатів.

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Програма досліджень

Проведення досліджень передбачає комплексне вирішення задач, пов'язаних із впровадженням електротехнологій у закритому ґрунті та підвищенням ефективності вирощування овочевих культур.

1. Виконати аналіз основних напрямів розвитку технологій вирощування овочів у спорудах закритого ґрунту із застосуванням електротехнологій, а також сформулювати основні завдання дослідження.
2. Розробити методичні підходи до оцінювання впливу електромагнітної обробки води та живильних розчинів мінеральних добрив.
3. Обґрунтувати основні конструктивні та функціональні параметри і створити лабораторну установку для магнітної обробки живильних розчинів.
4. Виконати теоретичні дослідження змін фізико-хімічних параметрів води та розчинів мінеральних добрив під дією магнітного поля.
5. Провести експериментальні дослідження впливу магнітної обробки на параметри води та живильних розчинів, а також визначити оптимальні режими обробки.
6. Дослідити вплив електромагнітної обробки поливної води на ріст, розвиток і продуктивність рослин.
7. Обґрунтувати параметри установок для магнітної обробки розчинів та розробити методику їх інженерного розрахунку.
8. Розробити та експериментально дослідити пристрої для магнітної обробки поливної води і розчинів мінеральних добрив з оцінкою їх ефективності.

2.2 Методика досліджень

Патентно-ліцензійні дослідження та літературний огляд перспективних технологій вирощування рослин у спорудах закритого ґрунту та

електротехнологій виконувалися на основі матеріалів Інституту науково-технічної та економічної інформації, реферативних журналів, а також інших доступних джерел науково-технічної інформації. На основі аналізу літератури з урахуванням досвіду передових господарств визначено найбільш перспективні технології вирощування рослин і можливості впровадження електротехнологічних рішень для підвищення техніко-економічної ефективності виробництва овочів у закритому ґрунті.

Під час розроблення методу оцінювання ефективності електромагнітної обробки поливної води та розчинів мінеральних добрив враховувалась необхідність використання первинного перетворювача з електричним вихідним сигналом, який забезпечує безперервний контроль змін параметрів водного розчину в процесі магнітної обробки. При цьому проба під час вимірювання не повинна зазнавати впливу зовнішніх електричних і магнітних полів, здатних змінювати її властивості. Зміни контрольованих параметрів повинні перевищувати похибку вимірювань відповідних величин, що забезпечує достовірність результатів.

Лабораторна установка для магнітної обробки живильних розчинів повинна забезпечувати можливість регулювання основних параметрів процесу: магнітної індукції, швидкості руху розчину та кількості перемагнічувань. Межі зміни цих параметрів визначалися на основі аналізу наукових джерел, присвячених магнітній обробці води, сольових і живильних розчинів. Регулювання магнітної індукції передбачається шляхом зміни підведеної напруги до котушок індуктора. Кількість реверсів магнітного поля змінюється шляхом підключення різної кількості котушок індукторів до джерела живлення. Діаметр трубопроводу установки приймається узгодженим із магістральними трубопроводами системи живлення рослин типу «аквадроп».

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що при магнітній обробці водних систем змінюється кінетика хімічних реакцій. Використовуючи рівняння Вант-Гоффа–Арреніуса, положення теорії зіткнень та теорії перехідного стану, а також враховуючи рух іонів у магнітному полі, встановлено

аналітичні залежності показників рН та окисно-відновного потенціалу від параметрів магнітного поля і складу розчину. Визначено основні фактори, що впливають на ефективність магнітної обробки.

Експериментальні дослідження змін параметрів води та розчинів мінеральних добрив проводилися на лабораторній установці шляхом пропускання розчинів через зону дії магнітного поля, створеного індукторами. Досліди виконувалися для розчинів із концентрацією солей 0,5 і 1,0 г/л. Магнітну індукцію змінювали в діапазоні 0–0,2 Тл. Температуру та швидкість руху розчинів підтримували на рівні, характерному для умов тепличного вирощування рослин (приблизно 20 °С та 1 м/с).

Показники окисно-відновного потенціалу та рН визначалися до і після проходження розчину через апарат магнітної обробки за допомогою іоніміра И-160М. На основі різниці вимірних значень оцінювався ефект магнітної обробки та його залежність від режимних параметрів процесу.

Досліди виконували в трикратній повторності. Дисперсію визначали за формулою

$$S_u^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{uj} - \bar{y}_u)^2}{m-1}, \quad (2.1)$$

де y_{uj} – вимірне значення величини в досліді з номером j ;

$\bar{y}_u$ – її середнє значення;

m – число паралельних спостережень.

Однорідність дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (2.2)$$

де $S_{u \max}^2$ – максимальна дисперсія;

$\sum_{u=1}^N S_u^2$ – сума всіх дисперсій.

При $G < G_{кр}$, де $G_{кр}$ — табличне значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значущості, приймалася гіпотеза про однорідність (одночасність)

дисперсій, що підтверджувало коректність статистичної обробки експериментальних даних.

Залежності показників рН та ОВП від характеристик магнітного поля визначалися аналітично з подальшим уточненням параметрів моделей за результатами експериментальних досліджень. Коефіцієнти у відповідних математичних залежностях визначалися методом найменших квадратів, що забезпечувало мінімізацію похибки апроксимації та підвищення точності моделей.

Адекватність отриманих математичних моделей перевірялася за критерієм Фішера, що дозволяло оцінити відповідність теоретичних залежностей експериментальним даним і підтвердити придатність моделей для подальшого використання в інженерних розрахунках та аналізі процесів магнітної обробки.

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2}, \quad (2.3)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

S^2 – середня дисперсія дослідів.

Дисперсія адекватності визначається за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-l} * \sum (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (2.4)$$

де $\hat{y}_u$ – розрахункове значення вихідної величини за отриманим рівнянням;

N – число дослідних точок;

l – число значущих коефіцієнтів.

Середня дисперсія дослідів визначається за формулою:

$$S^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N}. \quad (2.5)$$

При $F < F_{кр}$, де $F_{кр}$ — табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості, приймалася гіпотеза про адекватність математичної моделі, що підтверджувало її придатність для опису досліджуваних процесів.

Оптимальні значення магнітної індукції визначалися як розв’язок відповідного рівняння, отриманого на основі аналітичних та експериментальних залежностей, що описують зміну параметрів водних розчинів у магнітному полі. Розв’язання цього рівняння дозволяло встановити режимні параметри, за яких досягається максимальний ефект магнітної обробки та стабілізуються основні фізико-хімічні показники розчину.

$$\frac{d\hat{y}}{dB} = 0, \quad (2.6)$$

де B — магнітна індукція.

При дослідженні зміни ефекту магнітної обробки в часі проводили вимірювання рН води, обробленої в магнітному полі протягом трьох годин. Отримані експериментальні дані описувалися експоненціальною залежністю, а параметри апроксимуючої функції визначалися методом найменших квадратів, що забезпечувало мінімізацію відхилень між теоретичними та експериментальними значеннями.

Дослідження впливу електромагнітної обробки поливної води на ріст і розвиток рослин виконувалися відповідно до загальноприйнятої методики польового експерименту [36, 37]. Схема досліду передбачала такі варіанти: 1-й варіант (контрольний) — рослини поливали водопровідною водою; 2-й варіант — насіння попередньо замочували в активованій воді, після чого нею ж здійснювали полив рослин.

Експерименти проводилися у чотирикратній повторності. Дослідні ділянки розміщувалися в теплиці методом рендомізованих (звичайних) повторень. Площа кожної ділянки становила 8 м².

Оцінювання впливу електромагнітної обробки води здійснювали за показниками схожості насіння, біометричних характеристик рослин, накопиченої біомаси та рівня врожайності.

При статистичній обробці результатів дослідів, виконаних методом звичайних повторень, формували таблицю врожайності, визначали суми за варіантами V , повтореннями P та загальну суму $\sum X$. На основі цих даних обчислювали суму квадратів відхилень для подальшого дисперсійного аналізу результатів експерименту.

загальної

$$C_Y = \sum X^2 - C, \quad (2.7)$$

$$C = \frac{(\sum X)^2}{m \cdot l}, \quad (2.8)$$

де m – кількість повторностей,

l – кількість варіантів;

між варіантами

$$C_V = \frac{\sum V^2}{m} - C, \quad (2.9)$$

між повторностями

$$C_P = \frac{\sum P^2}{l} - C, \quad (2.10)$$

всередені виборок

$$C_Z = C_Y - C_V - C_P. \quad (2.11)$$

Визначили дисперсію варіантів

$$S_V^2 = \frac{C_V}{l-1} \quad (2.12)$$

та залишкову дисперсію

$$S_Z^2 = \frac{C_Z}{(l-1) \cdot (m-1)}. \quad (2.13)$$

Щоб визначити, чи існують варіанти, які суттєво відрізняються від інших, визначали F -критерій:

$$F = \frac{S_V^2}{S_Z^2}.$$

(2.14)

Якщо $F > F_{кр}$, то в досліді є варіанти, які суттєво відрізняються від інших.

Для характеристик точності дослідів та оцінки частинних відмінностей визначали:

– узагальнену похибку середнього:

$$S_o = \sqrt{\frac{S_z^2}{m}}; \quad (2.15)$$

– точність дослідів:

$$\sigma = \frac{S_o}{\bar{X}} \cdot 100 \%; \quad (2.16)$$

– найменшу суттєву різницю (НСР) для 5%-ного рівня:

$$HCP = \sqrt{2} \cdot S_o \cdot t, \quad (2.17)$$

де t – критерій Стюдента для 5%-ного рівня значущості.

На основі проведених досліджень щодо зміни параметрів води та розчинів мінеральних добрив при магнітній обробці обґрунтовано конструктивні та режимні параметри відповідних пристроїв, а також розроблено методику їх інженерного розрахунку. Отримані результати дозволили уточнити вимоги до магнітних систем і підвищити ефективність їх роботи в умовах тепличного виробництва.

Розрахунок пристроїв для магнітної обробки води і живильних розчинів базувався на положеннях теорії магнітних кіл. У процесі проектування визначалися основні параметри магнітопроводу, зокрема площа його поперечного перерізу, кількість витків обмотки та кількість шарів проводу в індукторі. На основі отриманих розрахунків здійснювався вибір обмотувального проводу з урахуванням електричних навантажень та теплових режимів роботи.

Під час експериментального дослідження пристрою для магнітної обробки води і розчинів мінеральних добрив встановлено залежність магнітної індукції від струму в індукторі, а також її просторовий розподіл уздовж осі трубопроводу.

Для визначення залежності магнітної індукції від струму від випрямляча ПЗ-Н-02 подавалася регульована напруга живлення в межах 0–36 В на індукторі.

У центрі повітряних зазорів значення магнітної індукції вимірювалися тесламетром типу 43205, а контроль струму здійснювався приладом Ц4313. Отримані експериментальні дані апроксимувалися методом найменших квадратів, а адекватність математичної моделі перевірялася за критерієм Фішера.

Дослідження розподілу магнітної індукції вздовж осі труби виконувалися при фіксованому струмі індуктора 1 А. При переміщенні вимірювального щупа тесламетра вздовж осі трубопроводу фіксувалися значення індукції магнітного поля, на основі чого будувалися відповідні графічні залежності.

На основі отриманих результатів розроблено екстремальну систему автоматичного регулювання, аналіз і синтез якої виконано з використанням положень теорії автоматичного керування, що забезпечує підтримання оптимальних режимів магнітної обробки в реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ

На основі вивчення змін фізико-хімічних властивостей води під дією магнітної обробки встановлено, що для індикації її ефекту можуть бути використані різні методи дослідження, зокрема оптичні, кристалохімічні, коагуляційні, електрохімічні, хімічні та магнітометричні.

Проведений аналіз показав, що найбільш доцільним для практичного застосування є використання потенціометричних методів вимірювання. Первинні вимірювальні перетворювачі, які застосовуються в таких системах, формують електричний вихідний сигнал, що забезпечує можливість безперервного контролю параметрів розчину. При цьому вимірювальна проба не піддається додатковому впливу електричних або магнітних полів, які могли б змінити її фізико-хімічні властивості та спотворити результати.

Для оцінювання можливості використання промислового рН-метра-мільвольтметра як засобу індикації ефекту магнітної обробки було проведено дослідження похибок та невизначеності вимірювання показників рН і окисно-відновного потенціалу (ОВП) за допомогою зазначеного приладу. Отримані результати дозволили визначити межі його застосування та обґрунтувати доцільність використання для оперативного контролю змін у живильних розчинах.

Для рН-метра, який градується за двома робочими еталонами рН 2 розряду, рівняння моделі вимірювання має вигляд

$$pH_x = pH_s - \frac{(E_s - E_x)}{S_t}, \quad (3.1)$$

де pH_x - рН досліджуваного розчину;

pH_s - рН робочого еталона 2 розряду;

E_s - е.р.с. електродної пари в еталонному розчині;

E_x - е.р.с. електродної пари в досліджуваному розчині;

S_t - крутість водневої характеристики;

$$S_t = -(54,197 + 0,1984t), \quad (3.2)$$

де 54,197 мВ/рН – крутість водневої характеристики при $t = 0$ °С;

0,1984 мВ/°С – температурний коефіцієнт потенціалу електрода.

Стандартні невизначеності вимірюваних величин визначаються методами типу А або типу В залежно від характеру вихідної інформації, обсягу експериментальних даних та наявності можливостей для отримання статистично обґрунтованих оцінок.

Оцінку вимірюваної величини за результатами n незалежних спостережень визначають як середнє арифметичне значення сукупності вимірювань, що дозволяє зменшити випадкову складову похибки та підвищити достовірність отриманих результатів.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (3.3)$$

де x_k – спостереження вимірюваної величини.

Стандартні невизначеності типу А представляють експериментальним стандартним відхиленням середнього значення [39]:

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}, \quad (3.4)$$

Стандартну невизначеність типу В визначають на основі апіорної інформації, отриманої з результатів попередніх вимірювань, накопиченого практичного досвіду або загальних знань про властивості досліджуваних матеріалів і засобів вимірювання. До джерел такої інформації також належать технічні характеристики засобів вимірювальної техніки, дані виробника, результати метрологічної атестації, повірки, калібрування, а також довідкові значення, яким приписується певна невизначеність.

У випадку, коли розподіл значень вимірюваної величини приймається рівномірним (прямокутним), стандартну невизначеність типу В визначають за відповідною залежністю [39].

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}},$$

(3.5)

де a - границі максимально допустимих похибок вимірювального прилада.

Сумарна стандартна невизначеність для незалежних величин визначається за формулою:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{c_i^2 u(x_i)^2}, \quad (3.6)$$

де $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ - коефіцієнт чутливості.

Розширену невизначеність визначають за формулою:

$$U = k \cdot u_c(y),$$

(3.7)

де k – коефіцієнт охоплення, який на практиці приймають $k=2$ для рівня довіри 95 % [39].

Для рН-метра стандартна невизначеність згідно з рівнянням (3.1) розраховується за формулою:

$$u^2(pH) = u^2(pH_s) + \frac{u^2(E)}{S_t^2} + \left[\frac{(E_s - E_x)}{S^2} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \right]^2 u^2(t), \quad (3.8)$$

У рівнянні (3.8) перший доданок характеризує невизначеність робочого еталона рН, другий — невизначеність вимірювання електрорушійної сили

електродної системи, третій — складову невизначеності, що пов'язана зі зміною температури або різницею температур між градувальним і досліджуваним розчинами.

Якщо використати координати ізопотенціальної точки вимірювального електрода, залежність (3.1) може бути подана у вигляді альтернативної форми рівняння, що дозволяє спростити математичний опис процесу та зменшити вплив температурних похибок при обробці результатів вимірювання.

$$pH_x = pH_i + \frac{(E_x - E_i)}{S_t}, \quad (3.9)$$

де pH_i , E_i - координати ізопотенціальної точки електрода.

Тоді третій член рівняння (3.8) із урахуванням (3.2) і (3.9) можна записати у вигляді

$$\left[\frac{(E_x - E_i)}{S^2} \cdot 0,1984 \right]^2 u^2(t) = \left[\frac{(pH_x - pH_i)}{S^2} \cdot 0,1984 \right]^2 u^2(t). \quad (3.10)$$

При $t = 25$ °C крутість водневої характеристики $S = 59,16$ мВ/рН; $(pH_x - pH_i) = 3$, а коефіцієнт чутливості c_t складає $0,01$ рН/°C.

Тоді

$$u^2(pH) = u^2(pH_s) + u^2(pH) + 0,01 \cdot u^2(t). \quad (3.11)$$

Розглянемо розрахунок невизначеності при вимірюванні рН магнітоактивованої води за допомогою промислового рН-метра. Градування приладу виконувалося з використанням робочих еталонів другого розряду з номінальними значеннями рН 4,01 та 9,18 при температурі 25 °C, що забезпечує двоточкову калібровку вимірювальної системи в робочому діапазоні.

Бюджет невизначеності вимірювання рН наведено в табл. 3.1 і включає основні складові похибки, пов'язані з еталонними розчинами, вимірюванням електрорушійної сили електродної системи, температурними впливами та характеристиками вимірювального приладу. Такий підхід дозволяє комплексно

оцінити точність вимірювань та визначити внесок кожного джерела похибки в загальну невизначеність результату.

Таблиця 3.1

Бюджет невизначеності вимірювань рН промисловим рН-метром

Вхідна величина x_i	Значення оцінки	+/-	Тип невизначеності	Розподіл імовірності	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Коефіцієнт чутливості c_i	Вклад невизначеності $u(y_i)$	Процентний вклад
Виміряне значення рН розчину	7,28		A	нормальний	$2,0 \cdot 10^{-2}$	1,0	$2,0 \cdot 10^{-2}$	64
рН робочого еталона 2 розряду		0,01	B	прямокутний	$5,8 \cdot 10^{-3}$	1,0	$5,8 \cdot 10^{-3}$	18
Відхилення температури розчину, °C	0	1,0	B	прямокутний	$5,8 \cdot 10^{-1}$	- 0,01	$- 5,8 \cdot 10^{-3}$	18
Визначене значення рН розчину	7,28				$2,2 \cdot 10^{-2}$			

Розширена невизначеність $U=4,3 \cdot 10^{-2}$ при $k=2$.

Результат показує, що оцінене дійсне значення рН розчину становить $7,28 \pm 0,043$, що відповідає прийнятному рівню точності вимірювань для промислових умов і дозволяє використовувати отримані дані для подальшого аналізу ефектів магнітної обробки.

Стандартну невизначеність вимірювання окисно-відновного потенціалу (ОВП) визначали за типом A, тобто на основі статистичної обробки результатів повторних вимірювань. Отримане значення становить 1 мВ, а розширена невизначеність при коефіцієнті охоплення $k = 2$ дорівнює 2 мВ, що забезпечує довірчу ймовірність близько 95 %.

Аналіз результатів показує, що зміни рН та ОВП при магнітній обробці значно перевищують похибку вимірювань. Зокрема, зміна рН становить 0,1–0,3 одиниці, а зміна ОВП — 8–10 мВ, що підтверджує статистичну значущість отриманого ефекту. При цьому перевага надається рН-метричним

вимірюванням, оскільки рН є інтегральним показником стану розчину, тоді як електроди для вимірювання ОВП характеризуються значним дрейфом потенціалу та тривалим часом встановлення показів, який може досягати 15–20 хв.

Аналіз літературних джерел, присвячених магнітній обробці води, розчинів солей і кислот, свідчить, що ефективність процесу залежить від параметрів магнітного поля, кількості перемагнічувань та швидкості руху розчину. Для типових апаратів магнітна індукція становить 0,04–0,2 Тл, швидкість потоку — 0,5–2,5 м/с, а число перемагнічувань — 3–8. У тепличних умовах швидкість руху води і розчинів зазвичай знаходиться в межах 0,5–1 м/с, що відповідає технологічним вимогам систем поливу.

На основі цих вихідних даних була розроблена лабораторна установка для магнітної обробки водних розчинів, яка включає накопичувальний бак, трубопровідну систему та апарат магнітної обробки. Схема установки наведена на рис. 3.1.

Конструктивно апарат для магнітної обробки складається з п'яти індукторів, кожен з яких містить намагнічувальну котушку, розміщену на магнітопроводі. У повітряному зазорі між полюсними наконечниками встановлена пластикова трубка, через яку проходить робочий розчин. Створене індукторами магнітне поле перетинає потік рідини, забезпечуючи взаємодію поля з іонною складовою розчину та формування ефекту магнітної обробки.

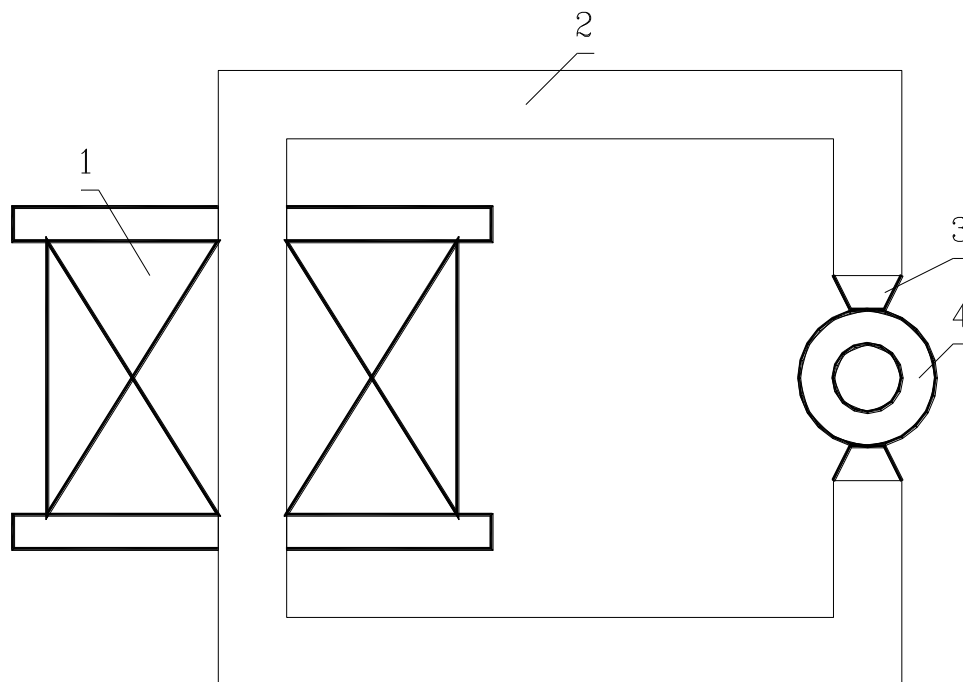


Рис. 3.1. Схема апарата для магнітної обробки водних розчинів:

- 1 – котушка індуктора; 2 – магнітопровід; 3 – полюсний наконечник; 4 – труба з розчином

Величина магнітної індукції регулюється шляхом зміни підведеної напруги до котушок індуктора в межах 0–36 В, що забезпечує керовану зміну магнітної індукції від 0 до 200 мТл. Такий діапазон дозволяє досліджувати вплив поля різної інтенсивності на параметри водних розчинів та визначати оптимальні режими магнітної обробки.

Число перемагнічувань регулюється шляхом поетапного підключення або відключення індукторів у робочому ланцюзі. Градієнт магнітного поля змінюється за рахунок регулювання відстані між індукторами при їх переміщенні вздовж осі трубопроводу, що дозволяє формувати різні просторові конфігурації магнітного впливу. Швидкість руху розчину встановлюється шляхом зміни продуктивності подаючого насоса, що забезпечує необхідний гідродинамічний режим у системі.

Для індикації ефекту магнітної обробки водних розчинів застосовується рН-метр-мілівольтметр або іонімір, які дозволяють оперативно контролювати

зміни електрохімічних параметрів середовища. Значення рН та окисно-відновного потенціалу (ОВП) вимірюються до та після проходження розчину через магнітний апарат, а оцінка ефективності обробки виконується на основі різниці отриманих значень, що характеризує ступінь впливу магнітного поля на досліджуваний розчин.

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ВОДИ ТА РОЗЧИНІВ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ПРИ МАГНІТНІЙ ОБРОБЦІ

Експериментально встановлено, що магнітна обробка водних розчинів впливає на кінетику хімічних реакцій.

Для хімічної реакції зміна концентрації продуктів реакції:

$$dC_i = \omega dt, \quad (4.1)$$

де C_i – концентрація речовини;

ω – швидкість хімічної реакції;

t – час.

Швидкість хімічної реакції:

$$\omega = k \prod_{i=1}^g C_i^{|v_i|}, \quad (4.2)$$

де k – коефіцієнт швидкості;

γ_i – стехіометричні коефіцієнти реакції.

При магнітній обробці розчинів в електромагнітному полі зміна концентрацій реагуючих компонентів є незначною, тому можна вважати, що зміна концентрації продуктів реакції пропорційна зміні коефіцієнта швидкості реакції.

Згідно з рівнянням Вант-Гоффа–Арреніуса, швидкість хімічної реакції визначається експоненційною залежністю від температури та енергії активації процесу, що дозволяє оцінювати вплив зовнішніх факторів, зокрема магнітного поля, на кінетику хімічних перетворень у водних розчинах.

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right), \quad (4.3)$$

де k_0 – передекспоненціальний множник;

E_a – енергія активації;

R – універсальна газова стала;

T – температура.

Або

$$\lg k = \lg k_o - \frac{E_a}{RT}. \quad (4.4)$$

Згідно з теорією зіткнення k_o характеризує вигідну для реакції просторову орієнтацію взаємодії активних молекул і визначається як [31]:

$$k_o = Z e^{\frac{S_a}{R}}, \quad (4.5)$$

де Z - коефіцієнт пропорційності;

S_a - ентропія активації.

Згідно з теорією перехідного стану [31]

$$k_o = \frac{kT}{h} e^{\frac{\Delta S_o}{R}}, \quad (4.6)$$

де ΔS_o – стандартна ентропія активації,

k – стала Больцмана;

h – стала Планка.

Величина рН розчину:

$$pH = -\lg a_{H^+} = -\lg fC_{H^+}, \quad (4.7)$$

де a_{H^+} – активність іонів водню;

f – коефіцієнт активності.

Оскільки зміна концентрації іонів водню C_{H^+} , які утворюються або перерозподіляються при магнітній обробці розчину, є пропорційною коефіцієнту швидкості реакції, то показник рН можна розглядати як функцію, що пов'язана з логарифмічною залежністю від цього коефіцієнта.

Таким чином, величина рН є пропорційною десятковому логарифму коефіцієнта швидкості реакції, що дозволяє використовувати рН як інтегральний індикатор змін, які відбуваються у водному розчині під дією магнітного поля.

$$\Delta pH = A_o \lg k, \quad (4.8)$$

де A_o – коефіцієнт.

Тоді при сталій температурі розчину згідно (4.3), (4.4), (4.5) зміна величини рН:

$$\Delta pH = A_o \Delta E, \quad (4.9)$$

де ΔE – зміна енергії взаємодії.

Аналогічно для окислювально-відновних потенціалів:

$$\Delta E = A_2 \Delta E. \quad (4.10)$$

При обробці води і розчинів солей в магнітному полі на іони діє сила Лоренца:

$$F = qBv \cdot \sin \alpha, \quad (4.11)$$

де q – заряд іона;

B – магнітна індукція;

v – швидкість руху іона;

α – кут між напрямом поля і рухом іона.

Сила Лоренца є силою, яка діє перпендикулярно до напрямку руху зарядженої частинки і вектора магнітної індукції, тому вона змінює лише напрям швидкості іона, не змінюючи його кінетичну енергію та модуль швидкості.

Якщо вектор швидкості іона перпендикулярний вектору магнітної індукції, то рух частинки відбувається по коловій траєкторії, радіус якої визначається умовами балансу між центроостремною силою та силою Лоренца.

$$r = \frac{mv}{qB}, \quad (4.12)$$

де m – маса іона,

звідки

$$v = \frac{qBr}{m}. \quad (4.13)$$

Гідратація іонів суттєво впливає на їх поведінку у водному розчині, зокрема на швидкість міграції, умови зближення частинок, а також процеси

адсорбції на межах поділу фаз. При проходженні іонів через магнітне поле можливі зміни структури їх гідратної оболонки, що може сприяти зменшенню просторових перешкод та полегшенню взаємодії між іонами [33].

Експериментальні дані щодо визначення констант швидкості реакцій ко свідчать, що результативність зіткнень частинок залежить не лише від повної кінетичної енергії відносного руху, а насамперед від її складової вздовж лінії центрів зіткнення. Тобто визначальну роль відіграє нормальна складова швидкості v_n , тоді як тангенціальна складова має другорядне значення в процесах активації хімічних реакцій [32].

$$E = \frac{\mu v_n^2}{2}, \quad (4.14)$$

де μ - зведена маса часток.

При магнітній обробці розчинів внаслідок дії сили Лоренца змінюється саме нормальна складова швидкості:

$$v_{n2} = v_{n1} + \Delta v_n, \quad (4.15)$$

де v_{n2} – нормальна складова швидкості при дії магнітного поля,

v_{n1} – швидкість руху іонів в розчині;

Δv_n – її приріст.

Як випливає із (4.13), приріст нормальної складової швидкості:

$$\Delta v_n = A_z B. \quad (4.16)$$

Коефіцієнт A_z залежить від природи іонів, що містяться в розчині, а також від кількості перемагнічувань, оскільки реверс магнітного поля змінює орієнтацію руху іонів та характер їх взаємодії у потоці.

Зміна кінетичної енергії відносного руху вздовж лінії центрів зіткнення визначається відповідною залежністю, яка враховує нормальну складову швидкості руху частинок та параметри магнітного поля, що впливають на динаміку іонних взаємодій у розчині.

$$\Delta E = \frac{\mu V_{n2}^2}{2} - \frac{\mu V_n^2}{2}, \quad (4.17)$$

або

$$\Delta E = \frac{\mu}{2} (\Delta V_n^2 + 2 V_{n1} \Delta V_n). \quad (4.18)$$

З урахуванням (4.16):

$$\Delta E = \frac{\mu}{2} (A_3^2 B^2 + 2 A_3 V_{n1} B). \quad (4.19)$$

Отже, зміна величини рН при незмінній швидкості руху розчину:

$$\Delta pH = a_1 B^2 + a_2 B, \quad (4.20)$$

де a_1 , a_2 – коефіцієнти.

Аналогічно зміна ОВП розчину при незмінній швидкості його руху:

$$\Delta E = a_1' B^2 + a_2' B, \quad (4.21)$$

Значення коефіцієнтів залежать від типу іонів, що присутні в розчині (їх маси, заряду та характеру руху), а також від кількості перемагнічувань і градієнта магнітного поля. У зв'язку з цим їх числові значення можуть бути визначені лише експериментально для конкретних режимів магнітної обробки та складу розчину.

Експериментальні дослідження впливу магнітної обробки на параметри води та розчинів мінеральних добрив проводилися на лабораторній установці при сталих умовах. Температуру води і розчинів підтримували на рівні +20 °С, що відповідає реальним умовам тепличного вирощування рослин. Швидкість руху розчину через апарат магнітної обробки становила 1 м/с. Концентрація мінеральних добрив у досліджуваних розчинах приймалася 0,5 г/л та 1 г/л.

Магнітну індукцію контролювали за допомогою тесламетра, а значення рН та окисно-відновного потенціалу (ОВП) вимірювали іономіром И-160М. Ефект магнітної обробки оцінювали за різницею показів приладу до і після проходження розчину через магнітне поле.

Досліди виконували у трикратній повторності. Відтворюваність результатів перевіряли за критерієм Кохрена. Оскільки розрахункове значення

критерію (див. додаток А) менше критичного 0,6898, можна зробити висновок, що досліди є відтворюваними з довірчою імовірністю 95 %.

Зміна рН води при магнітній обробці з різним числом перемагнічувань (1; 3; 5) представлена на рис. 4.1, а зміна ОВП — на рис. 4.2. Встановлено, що зі збільшенням магнітної індукції до певного оптимального значення рН зростає, а ОВП зменшується. Подальше підвищення індукції призводить до зворотного ефекту — зниження рН і зростання ОВП. Оптимальна магнітна індукція залежить від джерела водопостачання і для умов Київської області становить 100–110 мТл.

Аналогічний характер залежностей спостерігається і для живильного розчину Зонневельда [13], що підтверджує загальність отриманих закономірностей.

Дослідження розчинів солей і мінеральних добрив (рис. 4.5 та 4.6) показали подібний характер зміни рН та ОВП при магнітній обробці. При цьому ефект, як правило, є більш вираженим, ніж у випадку чистої води. Оптимальні значення магнітної індукції для цих розчинів незначно відрізняються від значень для вихідної води. Зміна рН досягає 0,1–0,3 одиниці і є більш суттєвою для розчинів з підвищеним початковим рН.

Встановлено, що ефективність магнітної обробки залежить від хімічного складу розчину, тобто від концентрації та комбінації іонів. У розчинах, що містять іони-структурутворювачі (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}), ефект є більш вираженим, ніж у системах з іонами, які руйнують структуру води (K^+ , NO_3^-).

Збільшення кількості перемагнічувань підсилює ефект обробки. Оптимальним є триразове перемагнічування, оскільки подальше його збільшення не дає суттєвого приросту ефекту, але призводить до ускладнення конструкції та збільшення габаритів установки.

Зменшення градієнта магнітного поля (збільшення відстані між індукторами) призводить до ослаблення ефекту магнітної обробки, що необхідно враховувати при проєктуванні апаратів.

Отримані експериментальні результати підтвердили адекватність теоретичних залежностей (4.20) та (4.21). Параметри моделей були визначені методом найменших квадратів [35] і наведені в таблицях 4.1 та 4.2. Перевірка за критерієм Фішера показала, що розрахункове значення менше критичного (3,71), що підтверджує адекватність моделей з довірчою імовірністю 95 %.

Оптимальне значення магнітної індукції отримане як розв'язок рівняння:

$$\frac{dpH}{dB} = 2a_1 + a_2 = 0, \quad (4.22)$$

звідки

$$B_{opt} = -\frac{a_2}{2a_1}. \quad (4.23)$$

Оптимальні значення магнітної індукції та максимальна зміна рН і ОВП води, розчинів солей і добрив при магнітній обробці наведені в табл. 4.1 та табл. 4.2.

Ефект магнітної обробки із плином часу зменшується за експоненціальним законом (рис. 4.7). Для досліджуваної води ця залежність має вигляд:

$$pH = 7.21e^{-0.008t}, \quad (4.24)$$

де t – час, с.

Вплив магнітних полів на воду та на розчини мінеральних добрив не можна віднести до стійких, так як протягом року властивості води змінюються.

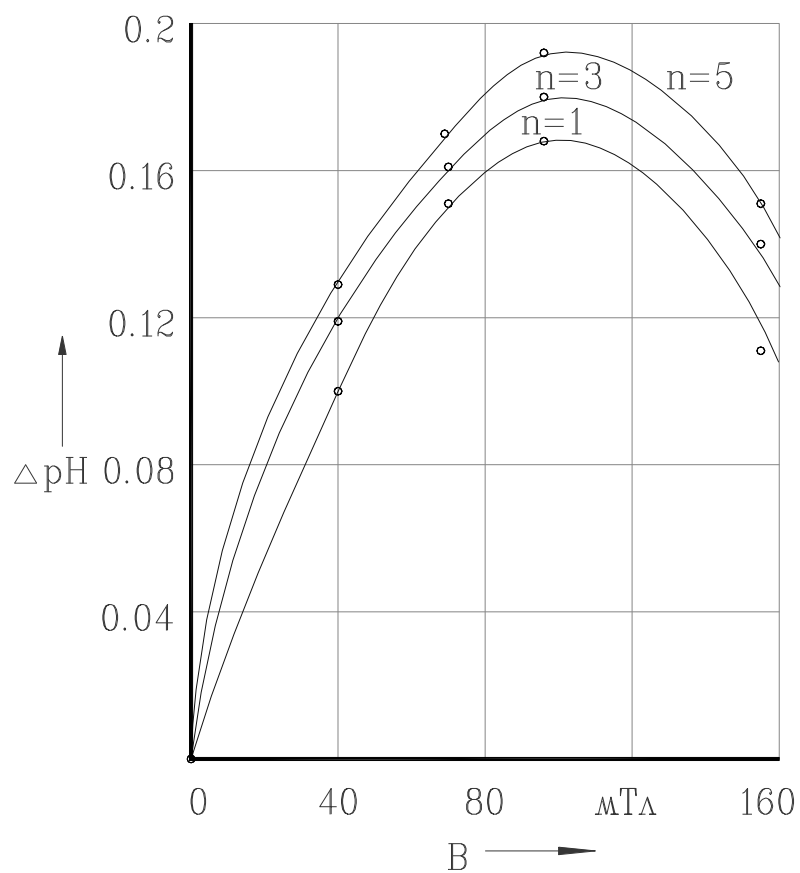


Рис.4.1. Зміна pH при магнітній обробці води

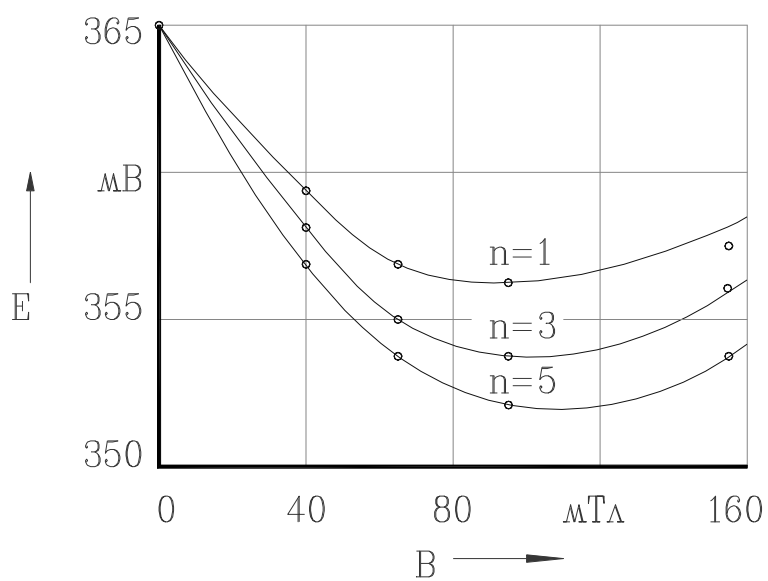


Рис.4.2. Зміна ОВП при магнітній обробці води

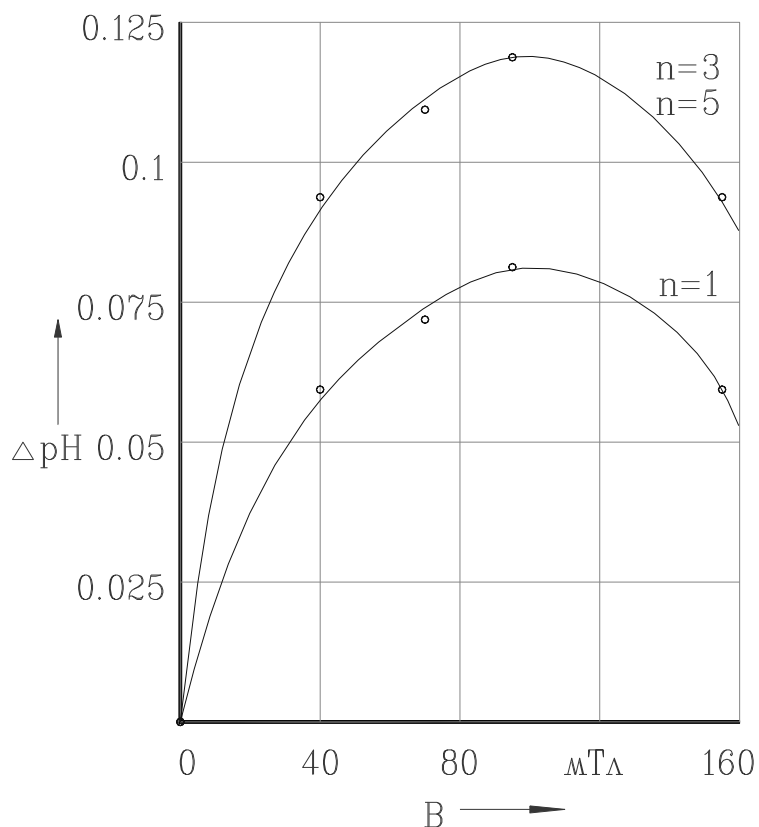


Рис.4.3. Зміна рН при магнітній обробці живильного розчину Зонневельда

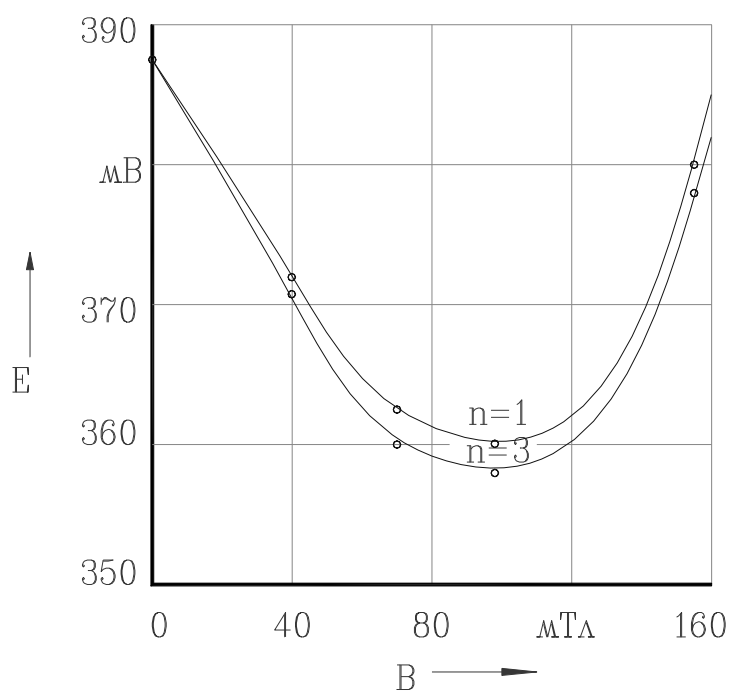


Рис.4.4. Зміна ОВП при магнітній обробці живильного розчину Зонневельда

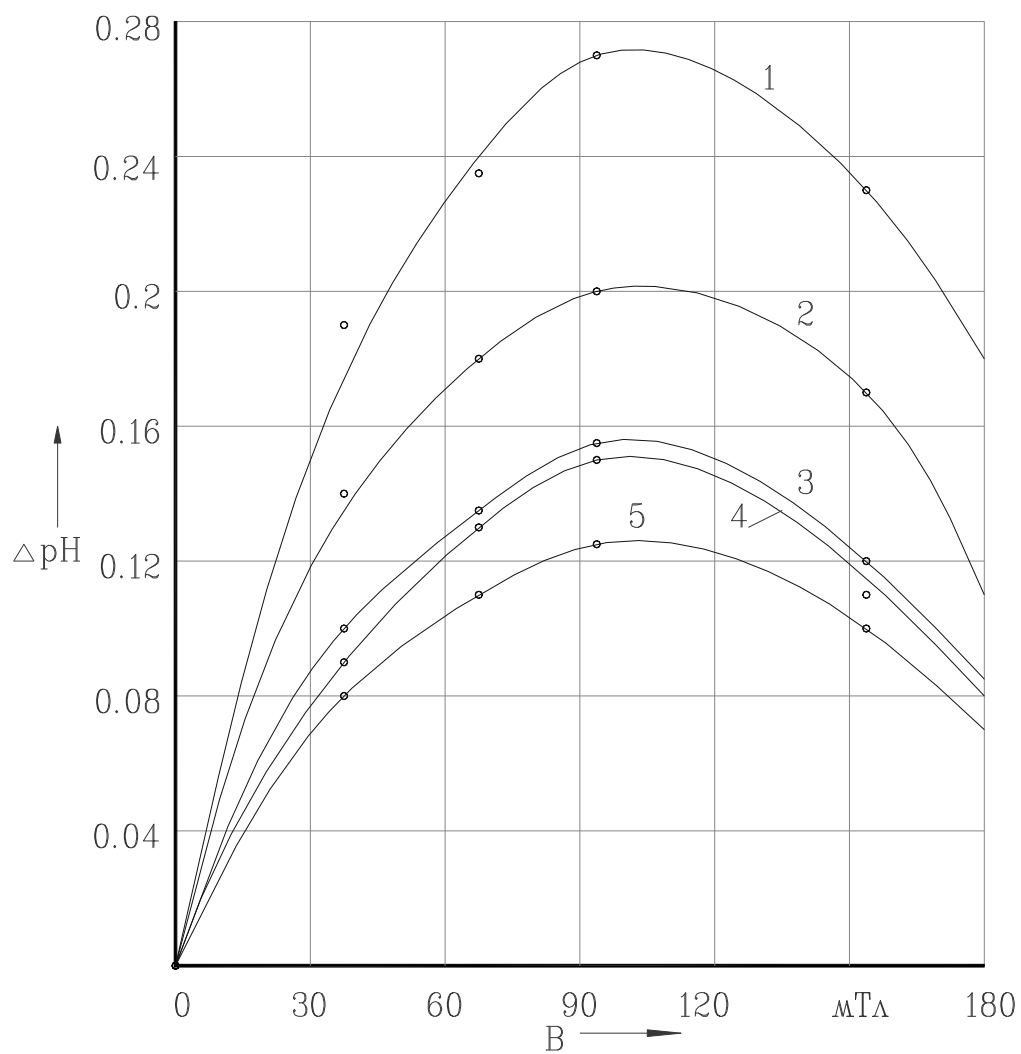


Рис.4.5. Зміна рН розчинів мінеральних добрив (1 г/л) при магнітній обробці з трикратним перемагнічуванням:

- 1 – кальцієва селітра;
- 2 – калій сірчаноокислий;
- 3 – аміачна селітра;
- 4 – магній сірчаноокислий семигидрат;
- 5 – калійна селітра.

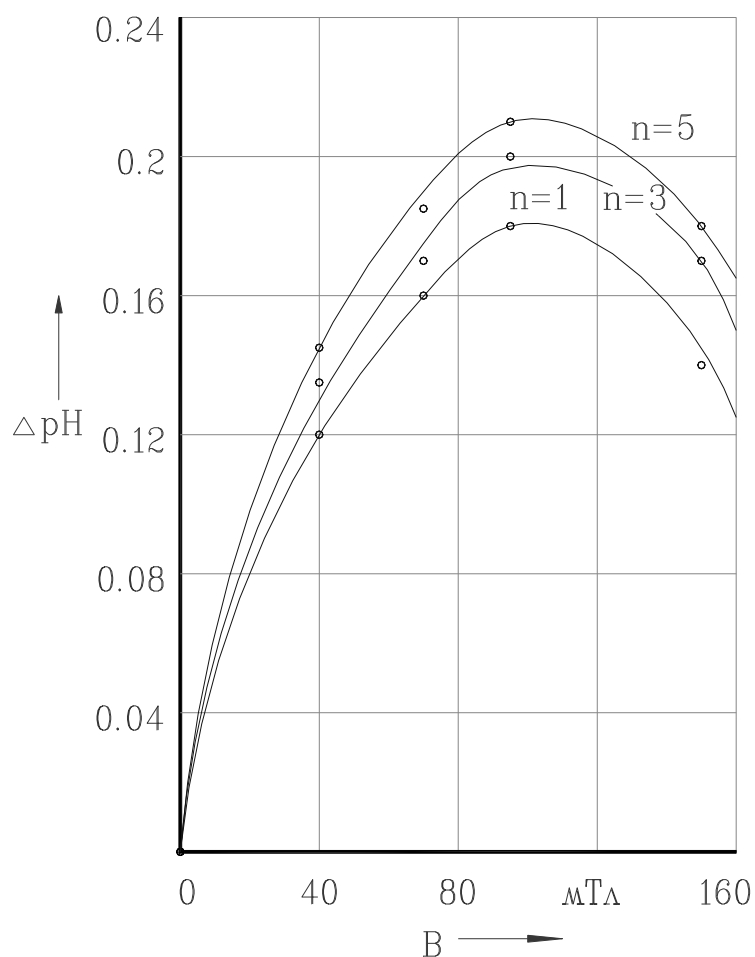


Рис.4.3. Зміна рН при магнітній обробці розчину сірчанокислого калію концентрацією 1г/л

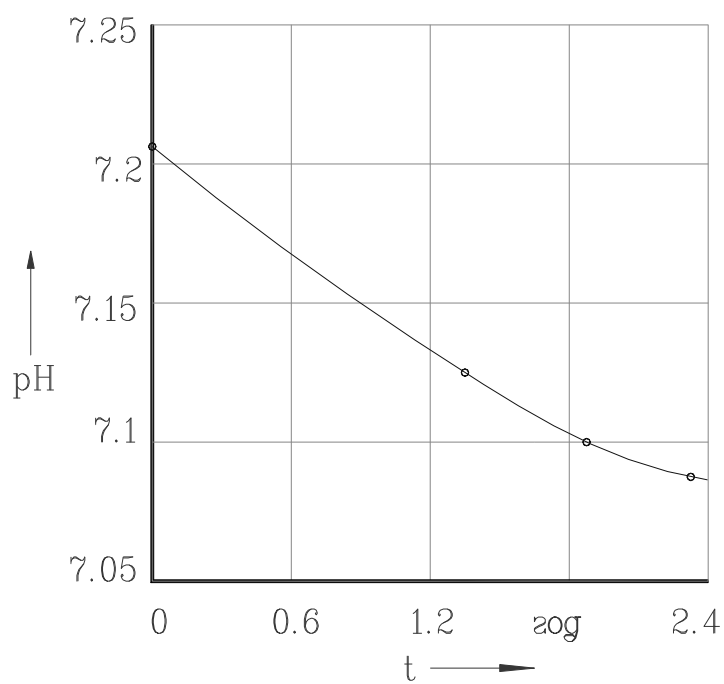


Рис.4.7. Зміна ефекту магнітної обробки в часі

Таблиця 4.1

Значення коефіцієнтів a_1 , a_2 та оптимальної магнітної індукції при магнітній обробці води і розчинів мінеральних добрив.

Розчин	Кількість перемагнічувань	Коефіцієнти		Оптимальна індукція, мТл	Максимальна зміна pH
		a_1 , од.рН/Тл	a_2 , од. рН/Тл		
1. Вода	1	-15	3,12	104	0,16
	3	-18,2	3,67		0,18
	5	-18,4	3,76		0,19
2. Розчин кальцієвої селітри	3	-24	5,09	106	0,27
3. Розчин сірчанокислового калію	3	-18,5	9,89	105	0,2
4. Розчин калійної селітри	3	-11,6	2,4	103	0,12
5. Розчин аміачної селітри	3	-13,9	2,9	104	0,15
6. Живильний розчин Зонневельда	3	-13,0	2,47	97	0,12

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнтів a'_1 , a'_2 та оптимальної магнітної індукції при магнітній обробці води і розчинів мінеральних добрив

Розчин	Кількість перемагнічувань	Коефіцієнти		Оптимальна індукція, мТл	Максимальна зміна ОВП
		a'_1 , од.рН/Тл	a'_2 , од. рН/Тл		
Вода	1	781	-170	104	-9
	2				-11
	3	1028	-215		-13
		1197	-248,2		
Живильний розчин Зонневельда	3	4076	-697,7	86	-29,9

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНОГО РОЗЧИНУ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН

Дослідження впливу магнітної обробки живильного розчину на ріст і розвиток рослин виконувалися відповідно до загальноприйнятої методики польового досліду [36, 37]. Експерименти проводилися за двоваріантною схемою:

1-й варіант (контрольний) — насіння замочували у водопровідній воді, а полив здійснювали неактивованим живильним розчином;
2-й варіант — насіння замочували в магнітоактивованій воді та подальший полив рослин здійснювали магнітоактивованим живильним розчином.

Обробка води і живильного розчину здійснювалася в магнітному полі з індукцією 100 мТл при триразовому перемагнічуванні, що відповідало встановленому оптимальному режиму попередніх досліджень.

Дослідні ділянки площею 8 м² розміщували методом рендомізованих (звичайних) повторень із дотриманням вимог до польового експерименту. Підготовка насіння, висів, догляд за рослинами та агротехнічні операції виконувалися відповідно до технології вирощування огірків у закритому ґрунті.

Досліди проводилися на гібриді огірка «Топольок». У процесі вегетації фіксували основні фенологічні фази розвитку рослин: посів, сходи, поява третього листка, початок цвітіння та формування зав'язі.

Отримані результати показали, що магнітна обробка живильного розчину позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. Дані біометричних вимірювань (табл. 6.1) свідчать, що приріст висоти рослин у варіанті з магнітоактивованим розчином є вищим, причому найбільш виражене та статистично достовірне перевищення спостерігалось на фазах початку цвітіння (10.07) та плодоношення (16.07) і становило відповідно 14,75 і 15,75 см.

Кількість листків та площа листкової поверхні у рослин дослідного варіанта також перевищували контрольні значення (табл. В.1 додатка В), що свідчить про інтенсифікацію процесів фотосинтезу та росту біомаси.

Додатково встановлено, що при магнітній обробці живильного розчину відбувається прискорення фенологічного розвитку рослин: цвітіння та плодоношення настають раніше на 1–2 дні (табл. 6.1, 6.2).

Маса рослин у дослідному варіанті також була більшою порівняно з контролем. На початку плодоношення вона становила 8,8 г при значенні $НСР_{0.5} = 1,86$ г, що підтверджує статистичну значущість отриманих відмінностей.

Встановлено також підвищення врожайності огірків при застосуванні магнітно обробленого живильного розчину. У контрольному варіанті врожайність становила 27,1 (табл. 6.4), тоді як у дослідному — 31,1, що відповідає приросту на 14,7 %.

Таким чином, результати досліджень підтверджують, що магнітна обробка живильного розчину позитивно впливає на ріст, розвиток та продуктивність рослин. Спостерігається прискорення розвитку фенологічних фаз, збільшення біомаси та підвищення врожайності овочевих культур.

Отримані дані також підтвердили правильність обраного режиму магнітної обробки: індукція 100 мТл, триразове перемагнічування та швидкість руху розчину в межах 0,5–1,0 м/с.

Таблиця 6.1

Результати біометричних вимірювань огірків

Варіант	Дата	Повторність				Середнє значення, см	Різниця Δ , см	F- критерій	Точність δ , %	НСР ₀₅ , см
		1	2	3	4					
Контроль	18.06	16	15	13	15	14.75				
	25.06	28	27	22	28	26.25				
	2.07	62	57	58	59	59				
	9.07	88	80	78	50	84				
	16.07	132	117	118	130	124.25				
Магніто– активована вода	18.06	17	16	13	17	15.75	1	6	1.9	1.3
	25.06	30	31	22	36	29.75	3.5	4.2	4.3	5.4
	2.07	70	71	59	75	68.75	9.75	8.33	3.7	10.9
	9.07	97	102	88	108	98.75	14.75	22	2.4	10
	16.07	147	138	132	143	140	15.75	76.8	0.96	5.72

Таблиця 6.2

Динаміка цвітіння огірків

Дата	Контрольний варіант, квіток					Дослідний варіант, квіток				
	Повторність									
	1	2	3	4	Серед нє	1	2	3	4	Серед нє
7.07	4	-	3	6	3	5	-	3	7	4
8.07	6	-	3	7	4	6	-	3	10	5
12.07	16	5	8	18	12	20	5	8	21	14
13.07	17	8	14	18	14	25	8	14	30	19

Таблиця 6.3

Маса рослин на початку періоду плодоношення

Варіант	Повторність				Середнє значення, г	Різниця Δ , г	F- критерій	Точність δ , %	НСР ₀₅ , г
	1	2	3	4					
Контроль	38.2	25.5	34.2	39	35				
						8.8	93	1.05	1.86
Дослідний	46	40	42	47	43.6				

Урожайність огірків

Варіант	Повторність				Середнє значення, $кг/м^2$	Різниця Δ , $кг/м^2$	F- критерій	Точність δ , %	НСР ₀₅ , $кг/м^2$
	1	2	3	4					
Контроль	27.2	26.2	26.5	28.5	27.1				
						4	1436	0.25	0.33
Дослідний	31.2	29.9	30.7	32.5	31.1				

РОЗДІЛ 6

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ РОЗЧИНІВ І МЕТОДИКА ЇЇ РОЗРАХУНКІВ

Проведені дослідження зміни параметрів води та розчинів мінеральних добрив при магнітній обробці показали, що оптимальний режим роботи установки забезпечується при магнітній індукції в межах 0,04–0,2 Тл, триразовому перемагнічуванні та швидкості руху розчину 0,5–1,0 м/с. Дотримання цих параметрів дозволяє отримати стабільний ефект магнітної обробки та забезпечити відтворюваність результатів.

Конструкція розробленого апарата для магнітної обробки води і живильних розчинів у тепличних умовах з електромагнітами наведена на рис. 6.1. Пристрій складається з трьох індукторів, кожен з яких містить намагнічувальну котушку, розміщену на магнітопроводі. У повітряному зазорі між полюсними наконечниками встановлена пластмасова труба, діаметр якої узгоджений із трубопроводом системи «аквадроп». Для зменшення потоків розсіювання магнітного поля використовуються спеціальні концентратори, що підвищують ефективність магнітного впливу на робочий розчин.

Індуктор формує магнітне поле, силові лінії якого перетинають потік води або живильного розчину у напрямку, перпендикулярному до руху середовища. Це забезпечує найбільш ефективну взаємодію магнітного поля з іонною складовою розчину.

Регулювання магнітної індукції здійснюється шляхом зміни напруги постійного струму, що подається на котушки індукторів, у межах 0–36 В. При цьому магнітна індукція змінюється в діапазоні 0–200 мТл, що дозволяє гнучко керувати режимами обробки залежно від складу та властивостей розчину.

Котушки індукторів вмикаються за зустрічною схемою, що забезпечує триразове перемагнічування потоку розчину під час його проходження через робочу зону. Така схема підвищує інтенсивність магнітного впливу та сприяє стабілізації ефекту обробки.

Застосування апаратів з електромагнітами порівняно з системами на постійних магнітах дозволяє отримувати вищі значення магнітної індукції та забезпечує її плавне регулювання. Це, у свою чергу, дає можливість змінювати режими обробки розчинів відповідно до їхнього іонного складу та концентрації.

Розроблена методика розрахунку апаратів для магнітної обробки з електромагнітами базується на визначенні параметрів магнітного кола. Виходячи із заданої напруженості магнітного поля в робочій зоні, виконується розрахунок магнітного потоку та подальший підбір конструктивних параметрів індуктора, що забезпечують необхідні режими магнітної обробки.

$$\hat{O} = B \cdot S, \quad (6.1)$$

де B – магнітна індукція в зазорі, Тл;

S – площа перерізу магнітного потоку, м^2 .

Магнітний опір повітряного зазора визначається за формулою:

$$R_i = \frac{\delta}{\mu \cdot S}, \quad (6.2)$$

де δ і S – відповідно довжина і площа зазору;

μ – магнітна проникливість повітря.

Магнітний опір феромагнітної ділянки магнітного кола

$$R_c = \frac{l}{\mu_c \cdot S}, \quad (6.3)$$

де l і S – відповідно довжина і площа перерізу магнітопровода;

μ_c – магнітна проникливість сталі при відповідній індукції.

Повний опір ділянки магнітного кола

$$R = R_n + R_c \quad (6.4)$$

Намагнічуюча сила котушки електромагніта

$$F = \Phi \cdot R \cdot K_3, \quad (6.5)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, що враховує невраховані магнітні потоки і потоки розсіювання; $K_3 = 1,2$.

Величину магнітного потоку розсіювання, як правило, неможливо точно визначити аналітично, тому її встановлюють експериментальним шляхом або за емпіричними залежностями. У зв'язку з цим намагнічувальну силу індуктора на етапі проєктування визначають наближено, із подальшим уточненням параметрів під час налагодження установки.

Необхідна магнітна індукція в робочому зазорі забезпечується за рахунок застосування концентраторів магнітного поля, які зменшують втрати на розсіювання та підсилюють корисний магнітний потік. Це особливо важливо при наявності вираженого поверхневого ефекту, коли розподіл магнітного поля стає нерівномірним. Для підвищення ефективності концентраторів їх поперечні розміри виконують зменшеними, що дозволяє локалізувати магнітний потік у робочій зоні та підвищити його щільність.

Переріз обмотувального проводу намагнічувальної котушки визначають на основі допустимої густини струму та теплового режиму роботи індуктора, що дозволяє забезпечити надійну роботу апарата без перегріву та втрати магнітних характеристик у процесі експлуатації.

$$S_n = \frac{F \cdot l_B \cdot \rho}{U}, \quad (6.6)$$

де l_B – середня довжина витка намотувального проводу;

ρ – питомий електричний опір матеріалу проводу (мідь);

U – номінальна напруга.

Число витків котушки

$$W = \frac{F}{j_{\text{дон}} \cdot S} = \frac{F}{I_{\text{дон}}}, \quad (6.7)$$

де $j_{\text{дон}}, I_{\text{дон}}$ – відповідно допустимі густина і сила струму.

Число витків в ряду намагнічуючої котушки

$$W_p = \frac{b}{K_n \cdot d_n}, \quad (6.8)$$

де b – конструктивний розмір каркасу котушки,

d_n – діаметр намотувального проводу з ізоляцією;

K_n – коефіцієнт нерівномірності укладки ($K_n = 1,1 \dots 1,2$ [34]).

Кількість шарів намотувального проводу

$$n = \frac{W}{K_n \cdot W_p} . \quad (6.9)$$

Опір котушки

$$R_k = \rho \cdot \frac{l_B \cdot W}{S_n} . \quad (6.10)$$

Розрахунковий струм

$$I = \frac{U}{R_k} , \quad (6.11)$$

а споживана потужність

$$P = n_k \cdot U \cdot I , \quad (6.12)$$

де n_k – кількість намагнічуючих котушок.

Проведений розрахунок електричних і магнітних параметрів установки для магнітної обробки поливної води і живильного розчину.

Магнітний потік

$$\Phi = 0,2 \cdot 0,18^2 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

Магнітний потік повітряного зазору

$$R_n = \frac{0.18}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.18 \cdot 0.4} = 2.0 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}.$$

Магнітний опір феромагнітної ділянки магнітного кола

$$R_c = \frac{0.48}{0.059 \cdot 0.18 \cdot 0.4} = 113 \text{ Гн}^{-1}.$$

Повний опір ділянки магнітного кола

$$R = 2.0 \cdot 10^6 + 113 \approx 2.0 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}^{-1}.$$

Намагнічуюча сила котушки електромагніта

$$F = 6.5 \cdot 10^{-3} \cdot 2.0 \cdot 10^6 \cdot 1.2 = 1.55 \cdot 10^4 \text{ A}.$$

Переріз обмоточного провoda

$$S_n = \frac{1.55 \cdot 10^4 \cdot 0.28 \cdot 17.2 \cdot 10^{-9}}{36} = 2.07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Число витків котушки

$$W = \frac{1.55 \cdot 10^4}{8.2} = 1900.$$

Число витків в ряду намагнічуючої котушки

$$W_p = \frac{130}{1.1 \cdot 1.69} = 70.$$

Число шарів намотувального провoda

$$n = \frac{1900}{1.1 \cdot 70} = 25.$$

РОЗДІЛ 7

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ МАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ

За наведеною методикою виконано розрахунок та виготовлено експериментальний зразок апарата для магнітної обробки живильних розчинів, після чого проведено його випробування в лабораторних умовах з метою перевірки отриманих розрахункових залежностей.

Залежність магнітної індукції в повітряному зазорі від струму індуктора наведена на рис. 7.1. Встановлено, що на початковій ділянці характеристики, яка відповідає робочому діапазону магнітних індукцій, залежність є практично лінійною, що дозволяє використовувати її для інженерних розрахунків та спрощеного визначення робочих режимів апарата.

$$B = 0.137 \cdot I + 0.07 . \quad (7.1)$$

При подальшому збільшенні струму дана залежність стає нелінійною внаслідок насичення магнітної системи:

$$B = 0.138 \cdot I^{0.89} . \quad (7.2)$$

Зміна магнітної індукції вздовж осі труби апарата для магнітної обробки водних розчинів наведена на рис. 7.2. Як впливає з отриманої залежності, максимальне значення магнітної індукції спостерігається в зоні розміщення полюсних наконечників індукторів. У міру переміщення вздовж осі трубки від одного індуктора до іншого індукція поступово зменшується і в середині між індукторами наближається до нульового значення, після чого змінює знак і знову зростає, формуючи характерний просторовий розподіл магнітного поля.

Проведені дослідження підтвердили, що для індикації ефекту магнітної обробки найбільш доцільно використовувати рН-метричні методи контролю, оскільки рН є інтегральним показником, який найбільш чутливо реагує на зміни фізико-хімічного стану розчину. Застосування розробленого апарата для

магнітної обробки водних розчинів разом із промисловим рН-метром дозволяє реалізувати систему автоматичного керування, що забезпечує підтримання оптимального режиму роботи установки для різних типів розчинів та змінних умов експлуатації.

Система автоматичного керування включає апарат магнітної обробки, тиристорний перетворювач напруги, рН-метр та екстремальний регулятор (рис. 7.3), що забезпечує автоматичне налаштування режимів роботи відповідно до поточних параметрів процесу.

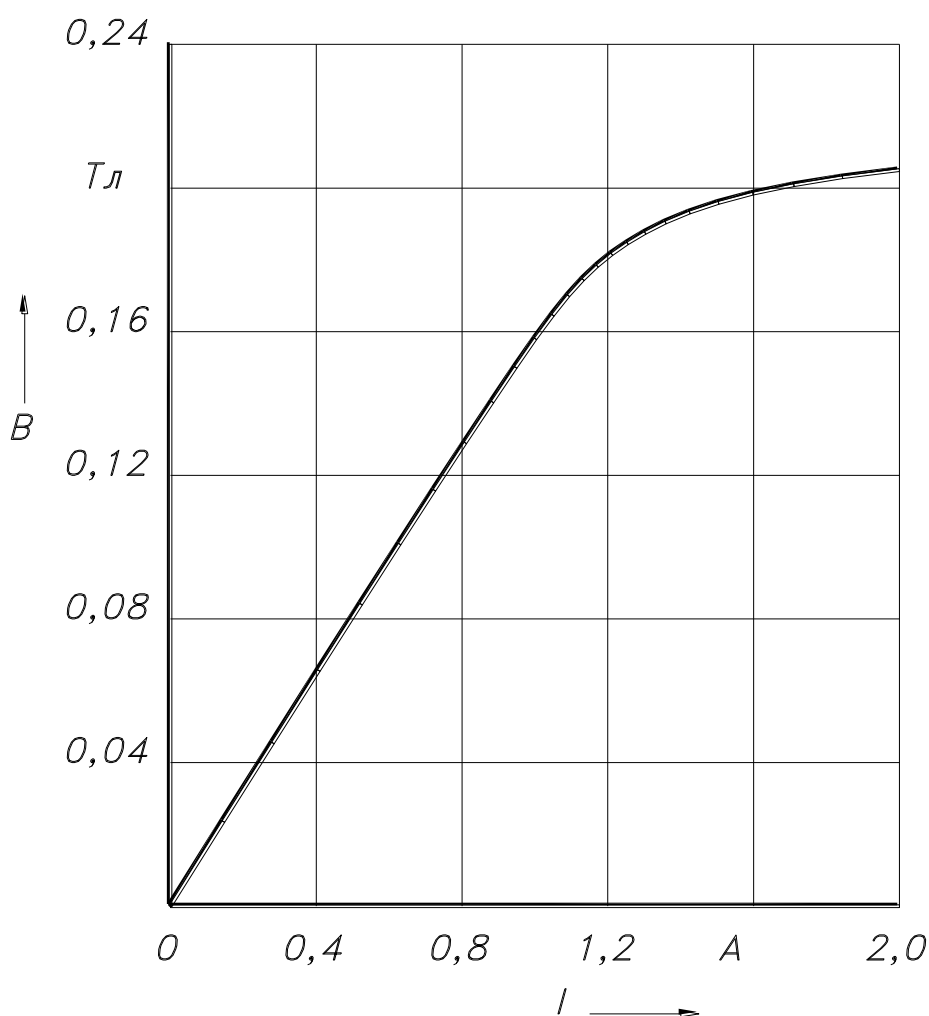


Рис. 7.1. Залежність магнітної індукції в повітряному зазорі від струму в індукторі

формуючи керуючий вплив відповідно до зміни контрольованого параметра. На основі цього сигналу регулятор подає керування на тиристорний перетворювач напруги, який змінює рівень підведеної напруги до індукторів, забезпечуючи відповідну зміну магнітної індукції в робочому зазорі.

Таким чином реалізується система автоматичного підтримання оптимальної магнітної індукції, яка адаптується до зміни властивостей розчину та умов його обробки.

За відомою методикою були визначені передаточні функції окремих елементів системи автоматичного керування магнітною обробкою розчинів, після чого розроблено її структурно-алгоритмічну схему, наведена на рис. 7.3.

Для індуктора прийнято коефіцієнт передачі $K_3 = 6,4$ мТл/В та сталу часу $T_3 = 0,08$ с. Відповідно передаточна функція індуктора визначається як динамічна ланка першого порядку, що описує інерційні властивості магнітної системи та її реакцію на зміну керуючої напруги.

$$W_3(p) = \frac{6,4}{0,08p + 1}. \quad (7.3)$$

Для рН-метра коефіцієнт передачі $K_4 = 40$ мВ/од.рН, стала часу $T_4 = 1,82$ с, передаточна функція

$$W_4(p) = \frac{40}{1,82p + 1}. \quad (7.4)$$

Для тиристорного перетворювача напруги коефіцієнт передачі $K_2 = 3$, стала часу $T_2 = 0,01$ с, передаточна функція

$$W_2(p) = \frac{3}{0,01p + 1}. \quad (7.5)$$

Для інтегратора $K_1 = 1$, а передаточна функція

$$W_1(p) = \frac{1}{p}. \quad (7.6)$$

Для визначення амплітуди та частоти автоколивань застосуємо метод гармонічної лінеаризації, що дозволяє перейти від нелінійної системи до

еквівалентної квазілінійної моделі та проаналізувати умови виникнення стійких коливальних режимів.

Передаточну функцію лінійної частини системи представимо у вигляді узагальненого оператора, що описує динамічні властивості об'єкта керування та подальше формування частотних характеристик системи для визначення умов автоколивального режиму.

$$W_{\pi}(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p) = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{p(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}. \quad (7.7)$$

Лінійну ланку $W_4(p)$ та два нелінійні елементи J_1 і J_2 будемо вважати зведеною ланкою з передаточною функцією J_3 .

Еквівалентна амплітудно-частотна характеристика зведеної ланки

$$q_3(A_1, \omega) = q_1(A_1)q_2\left(\frac{\Delta}{A_2}\right)W_{\pi}(j\omega), \quad (7.8)$$

де Δ – зона нечутливості реле, $\Delta = 4\text{мВ}$.

Амплітуда на вході другого нелінійного елемента

$$A_2 = A_1 q_1(A_1) \frac{K_4}{\sqrt{4T_3^2 \omega^2 + 1}}. \quad (7.9)$$

У виразі (7.9) прийнято, що частота коливань на вході об'єкта є вдвічі меншою порівняно з виходом, що відповідає типовому режиму роботи екстремального регулятора та забезпечує коректність застосування методу гармонічної лінеаризації при аналізі автоколивальних процесів.

Для визначення коефіцієнтів гармонічної лінеаризації використовують відповідні аналітичні залежності, які дозволяють замінити нелінійну ланку еквівалентною гармонічною передаточною характеристикою, що залежить від амплітуди вхідного сигналу та параметрів нелінійності.

$$a_1(A_1) = \frac{1}{\pi A_1} \int_0^{2\pi} F(x) \sin 2y dy, \quad (7.10)$$

$$b_1(A_1) = \frac{1}{\pi A_1} \int_0^2 F(x) \cos 2y dy. \quad (7.11)$$

Для першої нелінійності

$$F(x) = -k_o A_1^2 \sin y. \quad (7.12)$$

Тоді взявши інтеграл, отримаємо

$$a_1(A_1) = 0; \quad (7.13)$$

$$b_1(A_1) = \frac{k_o A_1}{2};$$

$$q_1(A_1) = \sqrt{a_1^2(A_1) + b_1^2(A_1)} = \frac{k_o A_1}{2};$$

$$\mu_1(A_1) = \frac{\pi}{2}.$$

Другий нелінійний елемент являє собою послідовне з'єднання ідеального релейного елемента із зоною нечутливості та нелінійного логічного елемента, що формує складну статичну нелінійність у контурі керування. Така структура призводить до появи гармонічних складових у вихідному сигналі та потребує застосування методу еквівалентної лінеаризації.

Коефіцієнти гармонічної лінеаризації для даного нелінійного елемента визначаються за відповідними аналітичними залежностями [40], які враховують амплітуду гармонічного сигналу, параметри зони нечутливості та характеристики релейної ланки, що дозволяє перейти до еквівалентного опису нелінійної системи в частотній області.

$$a_2(A_2) = \frac{4U \cos \alpha}{\pi A_2}; \quad (7.14)$$

$$b_2(A_2) = -\frac{4U \sin \alpha}{\pi A_2}. \quad (7.15)$$

Із виразів (7.14) і (7.15) отримаємо

$$q_2(A_2) = \frac{4U}{\pi A_2}; \quad (7.16)$$

$$\mu_2(A_2) = -\alpha. \quad (7.17)$$

Таким чином, загальний зсув, який вносить нелінійний елемент J_n і зведений до частоти, визначається за формулою

$$\mu_n(A_1\omega) = \frac{\frac{\pi}{2} - \arctg 2\omega T_4}{2} - \alpha, \quad (7.18)$$

$$\text{де } 2\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{A_2 - \Delta}{A_2}. \quad (7.19)$$

Підставивши вираз (7.19) у формулу (7.18), отримаємо

$$\mu_n(A_1\omega) = -\frac{\arctg 2\omega T_3}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{A_2 - \Delta}{A_2}. \quad (7.20)$$

При цьому

$$q_n(A_1\omega) = \frac{4U}{\pi A_1}. \quad (7.21)$$

Умову гармонічного балансу запишемо у вигляді

$$20 \lg H_1(\omega) H_2(\omega) H_3(\omega) = 20 \lg \frac{1}{q_n(A_1\omega)}; \quad (7.22)$$

$$\theta_1(\omega) + \theta_2(\omega) + \theta_3(\omega) = -\pi - \mu_n(A_1\omega). \quad (7.23)$$

За цими формулами побудовані логарифмічна амплітудна та фазова характеристики лінійної частини системи (рис. 7.4). На шаблоні побудовані характеристики $20 \lg \frac{1}{q_n}$ та $-\pi - \mu_n$ і суміщені осі шаблону $\frac{1}{A_1}$ із віссю частот так, щоб точки А і В лежали на одній вертикалі. Таким, чином частота автоколивань $11,9 \text{ с}^{-1}$, а амплітуда $0,09 \text{ мТл}$.

Апарат для магнітної обробки встановлюється у розчинних вузлах (рис. 1.2, рис. 1.3) безпосередньо на трубопроводах подачі води, які використовуються для приготування концентрованих розчинів мінеральних добрив, а також на лініях подачі готового живильного розчину в тепличні системи.

Розроблене обладнання пройшло апробацію в лабораторних та виробничих умовах, у ході якої підтверджено його стабільну роботу, високу

експлуатаційну надійність та відповідність вимогам технологічного процесу магнітної обробки водних розчинів.

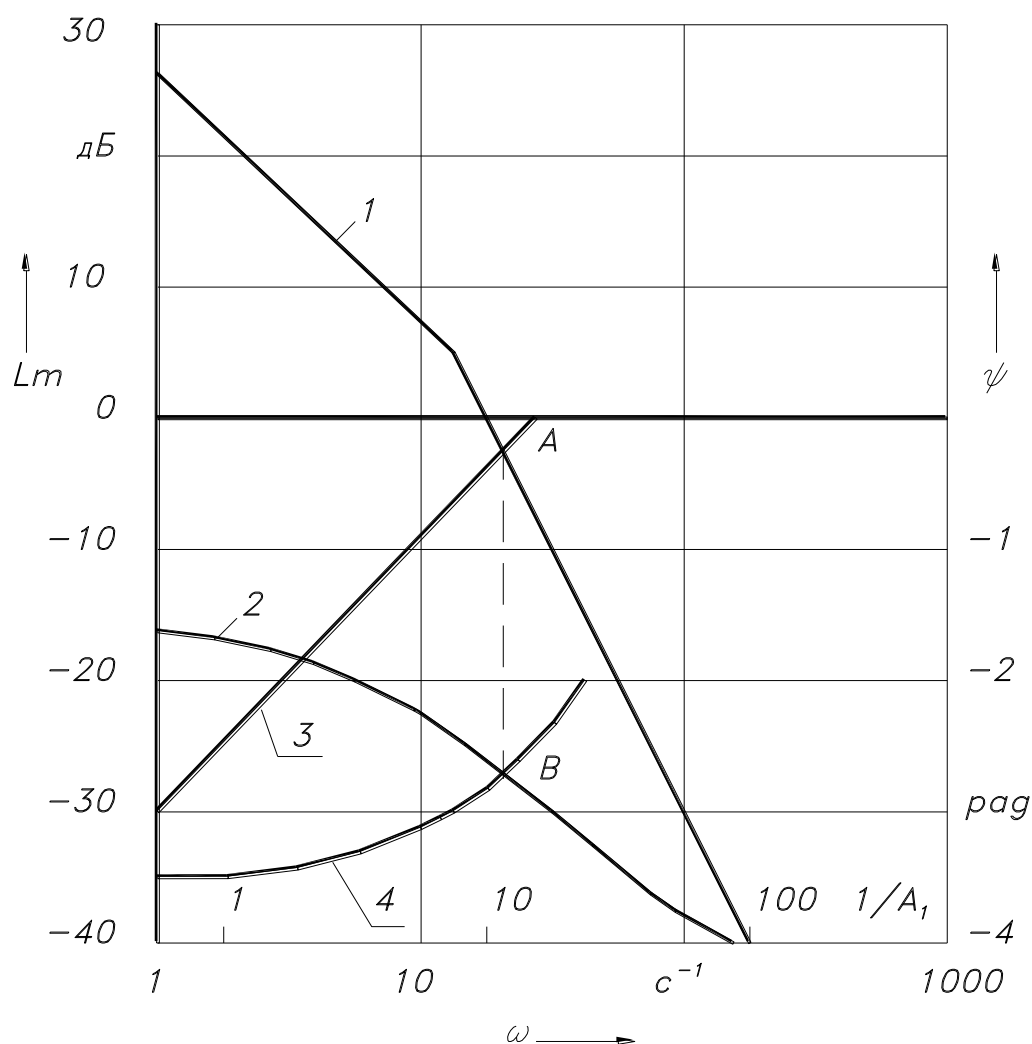


Рис. 7.4. Логарифмічні амплітудна (1) та фазова (2) частотні характеристики лінійної частини екстремальної системи з накладеними амплітудною (3) та фазовою (4) частотними

ВИСНОВКИ

1. Інтенсифікація овочівництва закритого ґрунту пов'язана із впровадженням енерго- та ресурсозберігаючих технологій вирощування овочів. Аналіз технологій вирощування овочів показує, що найперспективнішими є малооб'ємні технології із застосуванням електротехнологій для інтенсифікації процесу мінерального живлення рослин. Це дає можливість на 15 – 20% підвищити урожайність овочевих культур та якість продукції при зменшенні витрат води, енергії, мінеральних добрив.

2. Для індикації ефекту магнітної обробки розчинів найперспективнішим є потенціометричний метод із застосуванням електродів для вимірювання рН та ОВП розчинів.

3. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження зміни параметрів води і розчинів мінеральних добрив при магнітній обробці показали, що зміна рН та окислювально-відновного потенціалу прямо пропорційна квадрату магнітної індукції і залежить від числа перемагнічувань, градієнта магнітного поля, складу розчину та швидкості його руху. При збільшенні магнітної індукції до її оптимального значення 100 – 110 мТл рН води і розчину зростає, а ОВП спадає. При подальшому збільшенні магнітної індукції рН знижується і зростає ОВП. Збільшення числа перемагнічувань та градієнта магнітного поля підсилює ефект магнітної обробки. При швидкості руху розчину 0,5 – 1,0 м/с оптимальним є трикратне перемагнічування, так як подальше його збільшення не істотно змінює рН та ОВП розчину. В розчинах мінеральних добрив ефект магнітної обробки посилюється і залежать від концентрації та композиції окремих іонів. Ефект магнітної обробки із плином часу зменшується за експоненціальним законом.

4. Проведені польові дослідження показали, що магнітна обробка живильного розчину позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. При цьому раніше настає цвітіння і плодоношення, рослини мають кращі біометричні показники і більшу біомасу. Урожайність огірків при магнітній обробці поливної води в теплицях підвищується на 14,7%.

5. Обґрунтовані параметри і розроблена методика розрахунку пристроїв для магнітної обробки розчинів з електромагнітами. Проведені дослідження апарата для магнітної обробки живильного розчину.

Залежність зміни магнітної індукції від струму в індукторі в робочій області є лінійною, що дає можливість контролювати магнітну індукцію, вимірюючи струм.

Розроблена екстремальна система автоматичного керування магнітною обробкою розчинів, визначені якісні показники її роботи: частота автоколивань складає $11,9 \text{ с}^{-1}$, а амплітуда $0,09 \text{ мТл}$.

6. Магнітна обробка живильного розчину у теплицях дає можливість порівняно з існуючими технологіями підвищити урожайність овочевих культур на 15 – 20%, зменшити витрати мінеральних добрив на 10 – 15%, підвищити якість овочевої продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Graves C. I. The Nutrient Film Technique. Horticultural Reviews. 2017. Vol. 5. P. 1–44.
2. Sonneveld C. Growing cucumbers and tomatoes in rockwool. Proceedings of the 5th International Congress on Soilless Culture. 2020. P. 253–262.
3. Ikeda M. Soilless Culture in Japan. Farming Japan. 2015. Vol. 19, No. 6. P. 35–42.
4. Voogt S. J. pH control in soilless culture. Tuinderij. 2012. Vol. 62, No. 29. P. 20–23.
5. Vaughan J. Comparing ways of going hydroponic. Grower. 2020. Vol. 112, No. 2. P. 45–63.
6. Soffer H., Levinger D. The Ein Gedi system – research and development of hydroponic systems. Proceedings of the 5th International Congress on Soilless Culture. 2010. P. 241–252.
7. Nichols M., Christie B. Greenhouse Production in Japan. Practical Hydroponics & Greenhouses. 2008. No. 98.
8. Gierling T. H. Sensors and software for greenhouse automation. Hydroponics Worldwide: State of the Art in Soilless Crop Production. 2015. P. 36–41.
9. Kozyrskyi V., Savchenko V., Sinyavsky O. Presowing processing of seeds in magnetic field. IGI Global. 2018. P. 576–620.
10. Kozyrskyi V., Savchenko V., Sinyavsky O. Magnetic treatment of irrigation water and fertilizer solutions. International Journal of Energy Optimization and Engineering. 2020. Vol. 9(4). P. 74–83.
11. Schneider Electric. Electrical Installation Guide according to IEC standards. 2023.
12. Siemens AG. Industrial Automation Handbook. 2021.
13. IEC 60364-1:2021. Low-voltage electrical installations. Geneva : IEC, 2021.

14. ДСТУ EN 12464-1:2016. Освітлення робочих місць у приміщеннях. Київ : УкрНДНЦ, 2017.
15. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Київ : УкрНДНЦ, 2016.
16. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018.
17. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ, 1998.
18. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 7-ме вид. Київ : Міненерговугілля України, 2022.
19. Лавріненко Ю. М. та ін. Основи електропривода. Київ : Ліра-К, 2016.
20. Синявський О. Ю. та ін. Електропривод і автоматизація. Київ : Компринт, 2019.
21. Синявський О. Ю. та ін. Електропривод виробничих машин і механізмів. Київ : Компринт, 2020.
22. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В., Анохіна К. В. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання. Вінниця : ВНТУ, 2010.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1

Зміна рН та ОВП води при магнітній обробці (рН води 7,28)

В, Тл	Кількість перемагнічувань							
	n = 1		N = 3		n = 3*		n = 5	
	ΔpH	Е, мВ	ΔpH	Е, мВ	ΔpH	Е, мВ	ΔpH	Е, мВ
0	0	365	0	365	0	365	0	365
40	0.1	359	0.12	358	0.1	359	0.13	354
67	0.15	357	0.17	355	0.15	357	0.17	354
96	0.17	356	0.18	354	0.16	356	0.19	352
152	0.11	357	0.14	3565	0.13	357	0.15	356
G	0.33	0.2	0.43	0.2	0.25	0.2	0.33	0.2
F	2.96	0.3	0.57	0.12	0.16	0.3	1.91	0.12

- - градієнт магнітного поля вдвічі менший

Таблиця А.2

Зміна рН та ОВП живильного розчину Зонневельда при магнітній обробці (рН розчину 5,96)

В, Тл	Кількість перемагнічувань					
	n = 1		n = 3		n = 5	
	ΔpH	Е, мВ	ΔpH	Е, мВ	ΔpH	Е, мВ
0	0	388	0	388	0	388
40	0,06	372	0,09	371	0,08	370
67	0,07	362	0,11	360	0,11	360
96	0,08	360	0,12	358	0,12	358
152	0,06	380	0,09	378	0,09	318
G	0,25	0,3	0,33	0,26	0,25	0,25
F	1,03	3,59	2,45	3,43	1,83	3,4

Додаток Б

Таблиця Б.1

Зміна рН розчинів солей та мінеральних добрив при магнітній обробці

В, мТл	Калій сірчаноокислий					
	0,5 г/л			1,0 г/л		
	n=1	n=2	n=3*	n=1	n=3	n=5
0	0	0	0	0	0	0
40	0.11	0.13	0.11	0.12	0.14	0.15
67	0.18	0.2	0.18	0.16	0.18	0.18
96	0.22	0.24	0.21	0.18	0.2	0.21
152	0.19	0.23	0.17	0.13	0.17	0.18
G	0.2	0.57	0.4	0.25	0.25	0.4
F	3.28	0.59	1.34	0.88	3.19	2.6

Продовження таблиці Б.1.

В, мТл	Кальцієва селітра				Калійна селітра			
	0,5 г/л		1,0 г/л		0,5 г/л		1,0 г/л	
	n=1	n=3	n=1	n=3	n=1	n=3	n=1	n=3
0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0,15	0,19	0,17	0,19	0,08	0,09	0,09	0,09
67	0,21	0,25	0,21	0,23	0,12	0,13	0,11	0,11
96	0,23	0,27	0,23	0,27	0,13	0,15	0,13	0,13
152	0,2	0,2	0,21	0,23	0,09	0,12	0,11	0,1
G	0,5	0,25	0,31	0,31	0,25	0,4	0,25	0,57
F	0,84	3,07	3,63	2,86	0,5	0,1	1,89	2,38

Продовження таблиці Б.1.

В, мТл	Магній сірчаноокислий 7-водний				Аміачна селітра			
	0,5 г/л		1,0 г/л		0,5 г/л		1,0 г/л	
	n=1	n=3	n=1	n=3	n=1	n=3	n=1	n=3
0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0,08	0,1	0,08	0,08	0,07	0,09	0,08	0,1
67	0,13	0,13	0,13	0,13	0,1	0,13	0,12	0,13
96	0,13	0,15	0,15	0,15	0,12	0,15	0,15	0,15
152	0,1	0,13	0,11	0,11	0,1	0,12	0,12	0,12
G	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
F	2,68	0,93	2,13	1,99	0,57	0,1	0,18	0,72

* - градієнт магнітного поля удвічі менший.

Додаток В

Таблиця В.1

Кількість листків на рослинах огірків

Фаза розвитку	Варіант	Повторність				Середнє значення, шт.	Різниця Δ , шт..	F-критерій	Точність δ , %	НСР ₀₅ шт.
		1	2	3	4					
Початок	контроль	10	10	9	11	10				
							1	3	3.89	1.84
цвітіння	дослідний	12	10	9	13	11				
Початок	контроль	14	14	13	15	14				
							2	12	2.7	1.84
Плодоношення	дослідний	17	15	14	18	16				

Додаток Г

Таблиця Г.1

Залежність магнітної індукції від струму в індукторі

U, В	3,7	7,4	11	15	17,3	22,1	26	27,8	36
I, А	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	2
B, мТл	29	60	91	124	152	179	194	200	216

