

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

УДК 621.3.014.33:556

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ІНІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки та  
електротехнології

проф., д.т.н. \_\_\_\_\_ **КАПЛУН В.В.**  
(підпис)

доц., к.т.н. \_\_\_\_\_ **ОКУШКО О.В.**  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему: **«ОБРОБКА ВОДИ ІМПУЛЬСНИМ БАВ'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ»**

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

**Гарант освітньої програми**

д.т.н., професор  
**В.Є.**  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Кривонос**  
(ПІБ)

**Керівник магістерської роботи**

к.т.н., доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Савченко В.В.**  
(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Крючков Р.Р.**  
(ПІБ)

КИЇВ – 2025

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувача кафедри**  
**електротехніки, електромеханіки та**  
**електротехнології**

к.т.н доцент \_\_\_\_\_ **Окушко О.В.**  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
**СТУДЕНТУ**

**Крючкову Роману Руслановичу**

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Тема магістерської роботи «Обробка води імпульсним бар'єрним розрядом»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 14.12.2023 №2269"С"

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15.05.2025

Вихідні дані до магістерської роботи: «Правила улаштування електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз проблематики та обґрунтувати доцільність використання імпульсного бар'єрного розряду.

2. Провести аналіз імпульсного бар'єрного розряду за наявності води в розрядному проміжку.

3. Провести дослідження впливу імпульсного бар'єрного розряду на властивості води та її використання в рослинництві.

4. Розробити заходи з охорони праці.

6. Дослідити екологічні аспекти сучасних методів водоочищення.

Дата видачі завдання 15.12.2023

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

**Савченко В.В.**

(ПІБ)

**Крючков Р.Р.**

(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

**Магістерська кваліфікаційна робота: 70 с., 16 рис., 4 табл., 32 джерел.**

**Об'єкт дослідження** - процес очищення води за допомогою імпульсного бар'єрного розряду, що забезпечує генерацію високоактивних частинок та радикалів для розкладання забруднюючих речовин.

**Мета дослідження** - розробка наукових основ та експериментальному дослідженні процесів очищення води методом імпульсного бар'єрного розряду, визначенні умов, що забезпечують ефективне видалення органічних забруднювачів.

**Предмет дослідження** - електрофізичні процеси у водо-повітряних середовищах під дією імпульсного бар'єрного розряду, що впливають на енергоефективність очищення води.

Проведено комплексний аналіз сучасного стану проблеми забруднення водних ресурсів стійкими органічними забруднювачами (СОЗ) та обґрунтовано доцільність використання імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) як ефективного засобу їх деструкції. Розглянуто основні технології розвиненого окиснення (АОТ's) та визначено місце ІБР серед електророзрядних методів обробки води, зокрема з урахуванням його потенціалу генерації високоактивних окиснювачів без використання реагентів.

У межах дослідження вивчено особливості формування електричного поля в розрядному проміжку в присутності краплинно-плівкової водної фази. Побудовано чисельну модель розподілу електричного поля, в якій враховано вплив геометрії електродів, електропровідності середовища та полярності прикладених імпульсів. Показано, що локальні неоднорідності водного середовища сприяють підвищенню напруженості поля, що активізує процес генерації окислювальних радикалів.

**Ключові слова:** Імпульсний бар'єрний розряд, стійкі органічні забруднювачі, розвинені окисні технології, електрофізичні процеси, напруженість електричного поля, гідроксильні радикали.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ.....	6
1.1 Стан проблеми з питною водою та забруднення навколишнього середовища.....	6
1.2 Сучасні технології обробки води.....	7
1.3 Розвинені окисні технології (АОТ's) обробки води.....	8
1.3.1 Класифікація електророзрядних технологій обробки води.....	13
1.4 Показники, що характеризують ефективність електророзрядних АОТ's.....	14
РОЗДІЛ 2. ІМПУЛЬСНИЙ БАР'ЄРНИЙ РОЗРЯД ЗА НАЯВНОСТІ ВОДИ В РОЗРЯДНОМУ ПРОМІЖКУ.....	18
2.1 Особливості імпульсного бар'єрного розряду.....	19
2.2 Імпульсний бар'єрний розряд за наявності води в розрядному проміжку.....	21
2.2.1 Розподіл електричного поля імпульсного бар'єрного розряду при наявності крапель та плівки води в розрядному проміжку.....	22
2.3 Створення просторово однорідного імпульсного бар'єрного розряду при наявності води в розрядному проміжку.....	30
2.3.1 Створення однорідного імпульсного бар'єрного розряду при наявності плівки води на електродах.....	31
2.3.2 Однорідний імпульсний бар'єрний розряд при плівково-крапельному русі води.....	32
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ В РОСЛИННИЦТВІ.....	41
3.1 Теоретичні дослідження зміни параметрів води та розчинів мінеральних добрив при їх обробці в полі імпульсного бар'єрного розряду.....	41
3.2 Експериментальні дослідження зміни параметрів води і розчинів мінеральних добрив при їх обробці в полі бар'єрного розряду.....	47
3.3 Дослідження впливу обробки поливної води в полі бар'єрного розряду на ріст і розвиток рослин.....	54
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	57
РОЗДІЛ 5. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВОДООЧИЩЕННЯ ТА ПЕРЕВАГИ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ.....	60
ВИСНОВОК.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	65
ДОДАТКИ.....	69

## ВСТУП

Забезпечення якісної питної води є важливим завданням, особливо з огляду на зростаючий рівень забруднення поверхневих і підземних вод. Водні ресурси дедалі більше зазнають негативного антропогенного впливу, що обумовлює необхідність впровадження новітніх технологій очищення. Сучасні методи водопідготовки, хоча й широко застосовуються, часто не забезпечують достатньо ефективного видалення специфічних забруднювачів, особливо у випадках змішаного промислового впливу. Це пов'язано з постійним зростанням обсягів викидів у довкілля з боку фармацевтичної, хімічної, харчової та інших галузей промисловості, що призводить до появи у воді складних за структурою і властивостями домішок.

Особливу проблему становлять органічні сполуки, зокрема бензольні структури, які є надзвичайно стабільними і малореактивними до традиційних методів очищення, таких як механічна фільтрація, коагуляція або класичне знезараження. Найпоширенішим методом знезараження води досі залишається хлорування. Втім, воно має низку істотних недоліків, зокрема утворення побічних токсичних хлорорганічних сполук, які потенційно канцерогенні, а також низьку ефективність у боротьбі зі стійкими органічними забруднювачами (СОЗ). Тому виникає необхідність у розробці альтернативних підходів, здатних забезпечити глибоке та безпечне очищення води.

Протягом останніх десятиліть спостерігається інтенсивний розвиток технологій, що базуються на генерації високоактивних частинок безпосередньо у зоні обробки води. Йдеться про радикали ОН, атомарний кисень, молекули пероксиду водню ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), озону ( $\text{O}_3$ ), а також використання ультрафіолетового випромінювання. Такі підходи отримали узагальнену назву — розвинені окисні технології (АОТ's, Advanced Oxidation Technologies), які спрямовані на глибоку мінералізацію забруднювачів без утворення вторинного забруднення.

Серед різних видів АОТ особливе місце посідають методи, що базуються на електричних розрядах у водно-повітряному середовищі. Зокрема, імпульсний

бар'єрний розряд (ІБР) та коронний розряд привертають увагу дослідників завдяки своїй здатності до генерації широкого спектра активних агентів у газорідній фазі. Електророзрядні технології демонструють високу ефективність у знищенні стійких органічних забруднювачів, мікроорганізмів і навіть вірусів, що робить їх перспективними для використання в системах централізованого та локального водоочищення. Враховуючи можливість поєднання цих методів з відновлюваними джерелами енергії та автоматизованими системами управління, вони розглядаються як технології майбутнього у сфері охорони водних ресурсів...

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ

#### **1.1. Стан проблеми з питною водою та забруднення навколишнього середовища**

Вода є ключовим компонентом життєдіяльності, а її якісний стан визначає не лише стан здоров'я населення, а й стабільність функціонування екосистем. Проте зростаючий рівень антропогенного навантаження на водні об'єкти призводить до виникнення серйозних екологічних та інженерних проблем. Основним джерелом забруднення водного середовища залишаються промислові та побутові стоки, що містять широкий спектр хімічно активних речовин, серед яких особливо небезпечними є стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) [7].

Незважаючи на наявність багатоступеневих технологій очищення, таких як механічне фільтрування, коагуляція, флотаційні методи та хлорування, ці підходи не гарантують повного видалення СОЗ. Найпоширеніший метод – хлорування – часто призводить до утворення побічних токсичних сполук і виявляється малоефективним щодо складних органічних молекул, включаючи бензолні похідні.

Складні промислові скиди можуть містити як органічні, так і неорганічні речовини, які у взаємодії здатні утворювати ще більш стійкі та токсичні сполуки. Наприклад, розширення обсягів фармацевтичної продукції сприяє надходженню у водні системи біологічно активних речовин, які чинять ендокринний вплив на живі організми, змінюючи їхні фізіологічні процеси. Ці речовини недостатньо усуваються наявними методами, що актуалізує необхідність створення нових ефективних технологічних рішень.

Окрему категорію становлять мікрозабруднювачі – хімічні речовини, присутні у воді у надзвичайно низьких концентраціях (на рівні мкг/л або нг/л), але здатні накопичуватись у водній фауні, викликаючи біохімічні зміни та потрапляючи до харчових ланцюгів [2].

На глобальному рівні здійснено низку заходів з регулювання присутності таких речовин у навколишньому середовищі. Зокрема, в рамках «Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі» (2001 р.) був сформований перелік особливо небезпечних СОЗ, до якого включено пестициди, діоксини та інші промислові токсиканти [2]. Для їх ефективного усунення потрібні високоефективні підходи, серед яких перспективними є розвинені окисні технології (AOT's), зокрема електророзрядні методи обробки води.

Таким чином, з урахуванням посилення забруднення водного середовища та недостатньої ефективності традиційних способів очищення, постає необхідність розробки нових енергозберігаючих технологій, здатних ефективно знешкоджувати СОЗ.

## **1.2. Сучасні технології обробки води**

З огляду на ускладнення екологічної ситуації та зростання хімічного навантаження на водні об'єкти, у світі активно впроваджуються технології, спрямовані на покращення якості питної та технічної води. Сучасні підходи до очищення умовно поділяються на фізико-хімічні, біологічні та комбіновані методи, що орієнтовані на видалення як традиційних, так і стійких забруднювачів.

Біологічні методи очищення, засновані на використанні активного мулу або біореакторів, ефективні для видалення органічного забруднення, однак малоефективні щодо мікрозабруднювачів та стійких органічних сполук. Їх продуктивність значною мірою залежить від стабільності умов експлуатації та чутлива до токсичних домішок.

Комбіновані системи, що поєднують кілька методів (наприклад, біоочищення з мембранними процесами або адсорбцією), демонструють вищу ефективність у складних умовах, проте мають суттєві обмеження щодо вартості впровадження та експлуатації.

Водночас наукова спільнота визнає, що жодна з традиційних технологій у відриві не здатна гарантувати достатнє зниження вмісту стійких органічних забруднювачів у воді. Це зумовлює необхідність переходу до принципово нових технологічних рішень, які поєднують високу ефективність, екологічну безпеку та енергетичну доцільність.

### **1.3. Розвинені окисні технології (AOT's) обробки води**

Упродовж останніх десятиліть значну увагу науковців привертають технології, які забезпечують утворення високоактивних хімічних сполук безпосередньо в зоні обробки водного середовища. До таких реагентів належать гідроксильні радикали (OH), атомарний кисень (O), молекули перекису водню ( $H_2O_2$ ), озону ( $O_3$ ), а також супровідне ультрафіолетове випромінювання. Ці технології відомі під назвою AOT's (Advanced Oxidation Technologies) – передові окисні процеси. Їхня дія базується на двоетапному механізмі: спочатку відбувається генерація окиснювальних агентів *in situ* (тобто безпосередньо в об'ємі обробки), після чого активні компоненти вступають у реакцію з органічними забруднювачами, забезпечуючи їх руйнування [3].

Різноманіття AOT's зумовлюється багатством підходів до ініціації та активації радикальних процесів. До основних груп цих технологій відносяться: озон-орієнтовані процеси, УФ-ініційовані реакції, електрохімічні системи (eAOT), каталітичні методи (cAOT), а також фізичні підходи (pAOT), зокрема ті, що базуються на плазмових або електророзрядних ефектах. Варто зазначити, що така класифікація є умовною, оскільки на практиці ефективність очищення води суттєво зростає при комбінованому використанні кількох механізмів впливу [3].

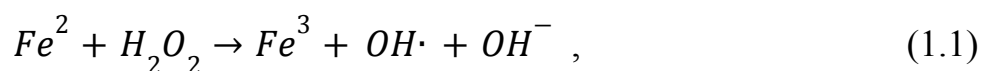
- Озон-орієнтовані AOT's (на основі  $O_3$ ). Однією з перших технологій, що застосовуються в передових методах очищення води, є озонування. Озон виконує роль потужного окисника та дезінфекційного реагенту. Він вибірково реагує з певними функціональними групами, зокрема з подвійними зв'язками, аміногрупами та активованими ароматичними кільцями,

такими як фенольні сполуки [3]. У процесі озонування додатково утворюються гідроксильні радикали, що наближає цю технологію до типових АОТ-процесів. Ефективність озону значно підвищується при комбінованому використанні з ультрафіолетовим опроміненням, перекисом водню ( $H_2O_2$ ) або каталізаторами.

- АОТ's, засновані на ультрафіолетовому випромінюванні. Цей тип процесів охоплює як самостійні (монофакторні) методи, так і їх поєднання з іншими окисними агентами. Найбільш поширеними джерелами УФ-випромінювання є ртутні лампи низького та середнього тиску, які генерують моно- або поліхроматичний спектр. Перспективним напрямом досліджень є використання УФ-світлодіодів (LED), що мають вузький спектр випромінювання, відсутність ртуті та малі розміри. Проте ефективність сучасних УФ-LED наразі не перевищує 10% [4,5].

- Електрохімічні АОТ's (eAOT's). Ці методи засновані на електрогенерації радикалів гідроксилу ( $\bullet OH$ ) без використання зовнішніх реагентів, що робить їх екологічно привабливими [4]. Проте активна дія таких радикалів обмежена в просторі – зона реакції становить лише кілька міліметрів. Тому в eAOT-системах важливо враховувати гідродинаміку потоку. Електрохімічні технології також ефективно знижують хімічне споживання кисню (ХСК), однак можуть призводити до утворення галогеновмісних побічних продуктів, що є суттєвим обмеженням [1].

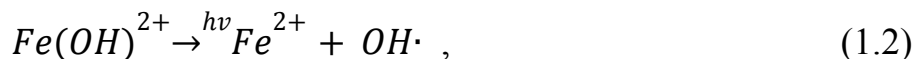
- Каталітичні АОТ's (cAOT's) в свою чергу розділяються на процес Фентона та фотокаталітичні АОТ's [3]. Процесом Фентона або реакцією Фентона називається реакція між двухвалентним залізом ( $Fe(II)$ ) і  $H_2O_2$  в кислому середовищі ( $pH \sim 3$ ), яка призводить до утворення  $OH\cdot$  (1):



При фотокаталітичних АОТ's, для окислювальних процесів використовуються фотоактивні каталізатори. Хоча існує велика кількість

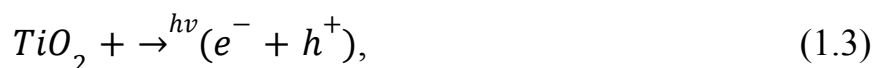
каталізаторів з фотокаталітичними властивостями (наприклад  $TiO_2$ ,  $WO_3$  або  $ZnO$ ) дослідження, в основному, зосереджені на двох типах реакцій:

однорідні фотофентонівські процеси:



де  $hv$  – енергія кванта;

гетерогенний фотокаталіз на основі  $TiO_2$ :



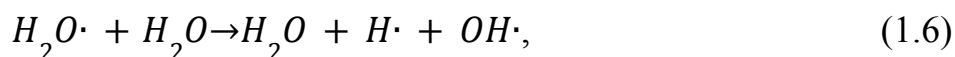
- Фізичні методи вдосконаленого окиснення (рАОТ) охоплюють низку технологій обробки води, серед яких виділяють вплив електричного розряду (плазмові технології), ультразвукову кавітацію, мікрохвильове опромінення та обробку електронними променями. Електророзрядні технології, зокрема плазмова обробка, є предметом численних наукових оглядів [7, 8, 9], що свідчить про значний інтерес до цієї галузі. Механізм ультразвукової обробки води, що зазвичай використовує частоти в діапазоні 20-500 кГц, ґрунтується на явищі акустичної кавітації. Під впливом звукових хвиль у водному середовищі формуються мікроскопічні бульбашки, які піддаються циклам стиснення та розширення. При досягненні критичних розмірів ці кавітаційні бульбашки імпульсивно руйнуються (схлопуються), генеруючи локальні екстремальні умови: миттєві температури, що перевищують 5000 К, тиск понад 1000 бар, а також утворення високоактивних хімічних радикалів. Незважаючи на ефективність у генерації окисників, практичне застосування ультразвуку характеризується значними енергетичними витратами та відносно низьким коефіцієнтом корисної дії порівняно з іншими технологіями вдосконаленого окиснення. З огляду на це, ультразвукову обробку найчастіше розглядають як компонент комбінованих систем, наприклад, у поєднанні з ультрафіолетовим

опроміненням або введенням хімічних окисників, таких як озон ( $O_3$ ) чи пероксид водню ( $H_2O_2$ ). Використання високоенергетичного електромагнітного випромінювання мікрохвильового діапазону (від 300 МГц до 300 ГГц) для обробки води також пов'язане з проблемою високих енерговитрат. Це зумовлено тим, що значна частка енергії мікрохвиль поглинається водою та трансформується в теплову енергію через індукцію внутрішніх коливань молекул, що не завжди є цільовим ефектом у процесах очищення.

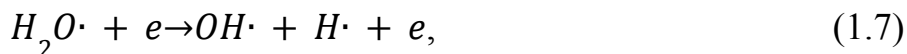
Серед розглянутих технологій очищення води, озонування та методи, що базуються на електричному розряді, демонструють найвищу конкурентоспроможність для промислового впровадження. Це особливо актуально з точки зору економічної ефективності та здатності деградувати стійкі мікробруднювачі, включаючи стійкі органічні бруднювачі (СОЗ). Специфіка процесу озонування полягає у тому, що обробка водного середовища здійснюється виключно озоном, який генерується в окремому пристрої (озонаторі) і потім подається в реакційну камеру для контакту з рідиною.

У багатьох випадках застосування єдиного окислювального агента виявляється недостатнім для ефективного видалення широкого спектру мікробруднювачів. Натомість, перевагою електророзрядної обробки є її здатність забезпечувати одночасну генерацію та дію комплексу різноманітних високоактивних частинок безпосередньо у водному середовищі, що суттєво підвищує загальну ефективність деструкції полутантів. Ключовим параметром, що характеризує активність цих частинок, є їхній окисно-відновний потенціал ( $\phi$ ). Наприклад, озон ( $O_3$ ) має окислювальний потенціал  $\phi(O_3)=2.1V$ , тоді як гідроксильний радикал ( $\cdot OH$ ) характеризується ще вищим значенням  $\phi(\cdot OH)=2.7V$ . Саме гідроксильний радикал відіграє особливо важливу роль у процесах розкладання мікробруднювачів завдяки своїй надзвичайно високій реакційній здатності. При електророзрядній технології він може утворюватися в нерівноважній плазмі одночасно за трьома типами плазмо-хімічних реакцій з молекулою води[10]:

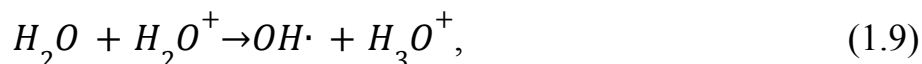
коливально-обертальне збудження:



дисоціація:



іонізація:



де індекс « $\cdot$ » означає, що молекула знаходиться в збудженому стані.

Коли кисень піддається впливу електричного розряду, атом O ( $\varphi(O) = 2,42$  В може генеруватися внаслідок дисоціації молекули O<sub>2</sub> і підвищує швидкість продукування OH [9].



Окрім зазначених процесів, атом кисню, що генерується в плазмі, здатен вступати в прямі реакції з забруднюючими речовинами, а також взаємодіяти з молекулярним киснем (O<sub>2</sub>), що ініціює утворення озону (O<sub>3</sub>).

Отже, як було зазначено раніше, електророзрядні методи очищення води мають низку важливих переваг. Вони вирізняються відносною технологічною простотою, високим потенціалом для вдосконалення, а також екологічною безпечністю, оскільки не потребують використання додаткових хімічних реагентів. Обробка води за допомогою плазмових розрядів дозволяє ефективно руйнувати молекулярну структуру складних органічних забруднювачів,

включно зі сполуками, які містять стійкі ароматичні фрагменти, зокрема бензольні кільця [11].

У зв'язку з цим, у подальших розділах основну увагу буде приділено саме електророзрядним технологіям як перспективному напрямку у сфері сучасного водоочищення.

### **1.3.1. Класифікація електророзрядних технологій обробки води.**

Електророзрядні технології очищення води є частиною розвинених окисних технологій (AOT's), які базуються на утворенні високоактивних окислювачів, здатних ефективно руйнувати органічні забруднювачі. Вони поділяються на кілька основних типів залежно від механізму дії розряду.

Імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) – один із найперспективніших методів, що дозволяє створювати велику кількість активних радикалів, зокрема  $\text{OH}\cdot$ ,  $\text{O}\cdot$  та  $\text{O}_3$ . Завдяки високій локальній напруженості електричного поля біля неоднорідностей (наприклад, крапель води), процес руйнування забруднювачів стає більш ефективним.

Імпульсний коронний розряд (ІКР) – характеризується утворенням слабкої плазми на поверхні води або електродів. Основним окиснювачем є озон, що обмежує ефективність технології в порівнянні з ІБР. Однак його перевагою є простіша технічна реалізація.

Бар'єрний розряд змінного струму (БР) – використовується для генерації озону, що є ефективним окиснювачем, але значно поступається імпульсним методам за рівнем енергоефективності.

Іскровий та дуговий розряди – забезпечують високотемпературну плазму, здатну знищувати органічні сполуки. Недоліком цих методів є високі енергетичні витрати та утворення побічних продуктів, що потребують додаткової очистки.

Серед усіх електророзрядних методів найефективнішим для очищення води є імпульсний бар'єрний розряд, оскільки він забезпечує високу

концентрацію активних радикалів при відносно низькому енергоспоживанні. Його унікальна особливість – створення неоднорідного електричного поля біля крапель води, що значно покращує ефективність розкладання забруднень. Саме тому ІБР є одним із найбільш перспективних методів у сфері електророзрядної обробки води.

#### **1.4. Показники, що характеризують ефективність електророзрядних АОР's**

В експериментальних дослідженнях ефективності різних електророзрядних технологій обробки води (ЕТОВ) переважно використовуються модельні розчини — вода з домішкою одного типу органічного забруднювача, найчастіше барвника [2,9,10]. Це обумовлено простотою методики оцінювання ступеня розкладання речовини за знебарвленням. Для таких розчинів загальноприйнятим показником ефективності є енергетичний вихід  $Y$  — відношення маси розкладеної речовини до вкладеної енергії [9].

При застосуванні ЕТОВ важливо враховувати утворення проміжних продуктів реакцій, однак у випадку барвників ці сполуки мають мінімальний вплив на кінцевий результат, що додатково спрощує аналіз. На відміну від модельних систем, стічні води містять велику кількість різнорідних речовин, тому для їх оцінювання використовують інші параметри, зокрема:

- Хімічне споживання кисню (ХСК) — кількість кисню, необхідного для окислення домішок у 1 л води. Його визначення потребує спеціального лабораторного обладнання.
- Біохімічне споживання кисню (БСК) — кількість кисню, використаного мікроорганізмами для розкладу нестійких органічних речовин.
- Вміст органічного вуглецю (ТОС) — показник загального вмісту вуглецевих органічних забруднювачів у воді.

Кількість стандартів для оцінки якості питної та стічної води є значною, що ускладнює порівняння результатів. Тому надалі для аналізу ефективності ЕТОВ використовуватимуться лише дані за модельними розчинами, а основним критерієм порівняння залишатиметься енергетичний вихід  $Y$ .

Для коректного аналізу ефективності електророзрядної обробки води слід уточнити, що на показник енергетичного виходу  $Y$  впливає низка ключових чинників. Найсуттєвіші з них:

- Середовище утворення та поширення розряду — тобто, чи відбувається процес безпосередньо у воді, чи в газовому просторі над нею. Це визначає характер формування активних частинок і їх подальшу взаємодію з забруднювачами.

- Питома поверхня контакту рідини в зоні розряду. Висока ефективність досягається за умов максимально розгалуженої поверхні води, оскільки глибина проникнення активних частинок у рідину є обмеженою. Найкращі результати забезпечуються, коли вода подається у вигляді тонкої плівки або дрібнодисперсного аерозолю. Для кількісного опису використовується показник розгалуженості поверхні  $\alpha$ , що визначається як відношення площі оброблюваної рідини  $S$  до її об'єму  $V$ . Наприклад, при розмірі крапель аерозолю  $d_k = 0,05$  мм значення  $\alpha$  сягає  $120$  м<sup>2</sup>/л. У випадку плівкової подачі рідини характерні значення  $\alpha$  залежать від товщини плівки  $\delta$  л. На практиці досяжною є мінімальна товщина плівки  $\sim 0,1$  мм. Таким чином, вибір середовища та конфігурації подачі води безпосередньо впливають на показник  $Y$  і мають бути враховані при порівнянні результатів різних ЕТОВ.

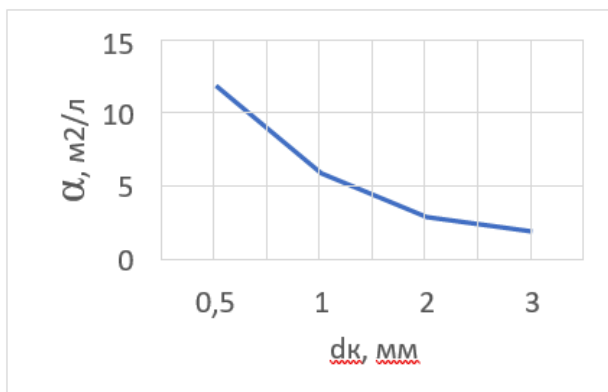


Рис. 1.1. Показники  $\alpha$  залежно від діаметру капель  $d_k$

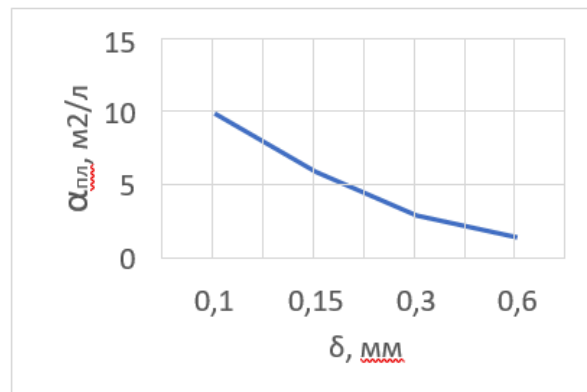


Рис. 1.2. Показники  $\alpha$  залежно від товщини плівки  $\delta_{пл}$

Зробивши аналіз рисунків, можна побачити, що найбільші показники  $\alpha$  майже однакові в обох випадках (коли  $d_k \approx 1$  мм, а  $\delta_{пл} \approx 0,15$  мм), але використання плівкового режиму руху рідини з високим показником  $\alpha$  різко знижує можливу продуктивність пристрою для обробки води на відміну від краплинного. Це пов'язано з тим, що при масштабуванні комплексу для обробки води та використанні плівкового руху води з  $\delta_{пл} \sim 0,15$  мм необхідно, щоб площа електродів складала десятки м<sup>2</sup>, що викликає додаткові труднощі, на відміну від використання крапельного руху рідини.

- Тип електричного розряду та характеристики напруги, що подається: Це включає розряди постійного або змінного струму, а також імпульсні розряди.

- Частота проходження імпульсів розряду: Цей параметр має неоднозначний вплив. Інтуїтивно можна очікувати, що збільшення частоти імпульсів призведе до прискорення процесу очищення води. Проте, наукові публікації вказують на існування оптимального діапазону частот, який зазвичай становить  $f \approx 100\text{--}500$  Гц [12,13,14]. Дослідники поки не надали вичерпного теоретичного обґрунтування цього явища. Імовірно, така залежність зумовлена кінетикою плазмохімічних реакцій, що відбуваються в просторі між

електродами. Найбільш ефективна частота імпульсів, як правило, визначається експериментальним шляхом.

- Концентрація та хімічна природа речовини, що забруднює воду: Чим вищий вміст забруднювача, тим більшою є енергетична ефективність процесу його видалення.

- Об'ємна швидкість подачі повітря: Для стабільної та ефективної роботи розрядної системи необхідно забезпечувати достатній рівень кисню в активній зоні. Цей фактор безпосередньо впливає на кількість та концентрацію озону, що утворюється під час розряду.

- Кислотність середовища (рН): Значення рН водного розчину впливає на інтенсивність та швидкість процесів деструкції забруднюючих речовин.

- Присутність у вихідному розчині специфічних добавок або каталітичних речовин: Такі сполуки, як пероксид водню, озон, сульфат заліза(II), діоксид титану, активоване вугілля тощо [13], можуть додаватися для стимулювання утворення гідроксильних радикалів (ОН), що є сильними окисниками.

- Тиск газового середовища (зазвичай повітря) в зоні обробки: Більшість технологій очищення води за допомогою електричних розрядів реалізуються за умов атмосферного тиску. Це обумовлено тим, що відпадає потреба у створенні та підтримці надлишкового або зниженого тиску, що, в свою чергу, веде до додаткових енергетичних та конструкційних витрат при розробці промислових установок. Крім того, для формування розряду за підвищеного тиску потрібна вища напруга.

## РОЗДІЛ 2

### ІМПУЛЬСНИЙ БАР'ЄРНИЙ РОЗРЯД ЗА НАЯВНОСТІ ВОДИ В РОЗРЯДНОМУ ПРОМІЖКУ

Бар'єрний розряд (БР) — це тип електричного розряду, що утворюється в газовому проміжку під впливом прикладеної до електродів напруги, за умови, що хоча б один із електродів ізолюваний шаром діелектрика. Аналіз осцилограм струму такого розряду показує, що при живленні змінною напругою розряд виникає періодично — двічі протягом одного періоду сигналу. Активізація розряду відбувається при досягненні напругою певного порогового значення, а його згасання збігається з моментом, коли напруга проходить через екстремум [15].

У процесі БР перенесення заряду відбувається за рахунок великої кількості мікророзрядів, які рівномірно розподіляються по всій площі електродів. Формування цих мікророзрядів є практично одночасним, оскільки проміжок часу між їх виникненням становить не більше 10 наносекунд. Інтервали між серіями мікророзрядів, при частоті живлення 50 Гц, наближуються до мілісекунд. Коли заряд у каналах мікророзряду повністю переноситься, напруга в проміжку знижується через зарядження діелектричного шару і наближається до рівня згасання  $U_{\text{згас}}$ . Після цього, під впливом зовнішнього джерела живлення, напруга знову зростає, досягає напруги пробою, і цикл повторюється. При знакоперемінній напрузі цей процес відбувається також у другому півперіоді.

Попри наявність діелектричного бар'єру, бар'єрний розряд має багато спільного з класичними розрядами між металевими електродами, зокрема щодо динаміки електричного поля в розрядному проміжку та розвитку лавинно-стрімерних процесів. Дослідження, представлені в [15], показують, що струм у мікророзряді БР відповідає наявності приблизно  $10^9 - 10^{10}$  електронів у розрядному каналі. Водночас критичне значення кількості електронів, необхідне

для розвитку стримера, становить приблизно  $n_{кр} \sim 10^8$ , що свідчить про схожість механізмів запуску розряду у різних конфігураціях.

У той же час у бар'єрному розряді перенос заряду призводить до накопичення його на поверхні діелектрика, що створює вторинне електричне поле, спрямоване протилежно до основного. У результаті відбувається зменшення загальної напруженості електричного поля в розрядному проміжку, що може знижувати ефективність процесу. Щоб мінімізувати цей ефект, важливо забезпечити крутий фронт напруги — її зростання має відбуватися за час, менший за 30 наносекунд, що відповідає часу проходження електронної лавини через міжелектродний проміжок (10–30 нс). Таких параметрів можна досягти лише при використанні джерел живлення з високою частотою, у межах 10–100 МГц. Однак, як було зазначено раніше, використання таких високих частот призводить до надмірного нагріву розрядного проміжку, що, у свою чергу, знижує ефективність утворення активних частинок і викликає додаткові втрати енергії. Разом із ускладненнями, пов'язаними із зарядженням діелектричного бар'єру та неможливістю досягнення високої напруженості поля, це свідчить про недоцільність застосування високочастотного БР у задачах обробки води.

### **2.1. Особливості імпульсного бар'єрного розряду**

Результати експериментальних досліджень щодо ефективності утворення окиснювальних агентів у процесі бар'єрного розряду свідчать про існування прямого зв'язку між концентрацією цих частинок і величиною об'ємної густини енергії в газовому середовищі [15]. Інакше кажучи, зі зростанням енергії, що передається в одиницю об'єму, збільшується кількість утворених окиснювачів, які й забезпечують подальшу реакційну активність під час очищення води. Проте варто зауважити, що існує певна гранична величина густини енергії, перевищення якої призводить до небажаного ефекту: швидкість розпаду окислювальних частинок починає переважати над швидкістю їх генерації. Це негативно впливає на загальну ефективність процесу, оскільки активні частинки

втрачають стабільність раніше, ніж встигають вступити в реакцію з забруднювачами. Порівняно з класичним бар'єрним розрядом, імпульсний бар'єрний розряд має суттєво вищі параметри робочого струму — на рівні одиниць ампер на квадратний сантиметр — а також забезпечує значно більшу енергію електронів у плазмі. Це, у свою чергу, підвищує величину енергії, що передається в одиницю об'єму газу. Таких показників вдається досягти завдяки виникненню значно сильніших електричних полів у міжелектродному просторі, які можуть у кілька разів перевищувати ті, що необхідні для запуску традиційного БР. Крім того, важливою перевагою імпульсного режиму є наявність відносно тривалих пауз між імпульсами, під час яких струм у системі відсутній. Це дозволяє мінімізувати непродуктивні втрати енергії та обмежити підвищення температури в газовому проміжку. Завдяки цьому умови залишаються сприятливими для стабільного існування хімічно активних частинок та перебігу плазмохімічних реакцій, що визначають ефективність знезараження й очищення води.

Як було зазначено у вступі до розділу 2, формування сильного електричного поля (порядку десятків кіловольт на сантиметр) у бар'єрному розряді змінного струму є практично неможливим. Це обумовлено тим, що зростання напруги на діелектричному бар'єрі супроводжується накопиченням об'ємного заряду, який частково екранує прикладене поле. Внаслідок цього ефективна напруга на розрядному проміжку зменшується. Спроба підвищити електричну напруженість призводить до зростання потенціалу на діелектрику, що своєю чергою знову потребує збільшення живильної напруги. Така петля зворотного впливу зумовлює зростання енергетичних витрат і ускладнює технічну реалізацію системи. Крім того, поєднання вимоги високої напруги з потребою у надвисокій частоті джерела живлення для компенсації енергетичних витрат робить бар'єрний розряд змінного струму малоефективним для цілей водоочищення. Також суттєво ускладнюється реалізація самих джерел живлення для такої системи.

На відміну від цього, імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) дозволяє формувати сильне електричне поле в розрядному проміжку без необхідності використання високочастотного живлення. Частота слідування імпульсів у такому режимі може залишатися у межах 50–500 Гц і не супроводжується перегрівом газової фази. Це стає можливим завдяки крутим фронтам імпульсів напруги, які забезпечують різке зростання електричної напруженості за дуже короткий час. Згідно з результатами, наведеними в [16], ефективність генерації іонізаційних хвиль тісно пов'язана зі швидкістю наростання прикладеної напруги. При достатньо високій швидкості зростання поля навіть у розрядному проміжку невеликої довжини (~1 мм) лавина електронів може досягнути критичної густини, необхідної для переходу в стримерний режим, ще до того, як вона встигне досягти анода. Це підтверджує важливість крутих фронтів для запуску ефективного електророзряду.

Таким чином, для реалізації електророзрядної обробки води найбільш доцільним є застосування імпульсного БР, який дозволяє формувати необхідне електричне поле в проміжку без надлишкових енергетичних та конструктивних витрат.

## **2.2. Імпульсний бар'єрний розряд за наявності води в розрядному проміжку**

Враховуючи, що імпульсний бар'єрний розряд застосовується безпосередньо для очищення водного середовища, виникає обґрунтована потреба з'ясувати, якою мірою наявність води в міжелектродному просторі впливає на електрофізичні характеристики розряду. Проте, з огляду на прикладну мету — саме обробку води, першочергове значення має розподіл напруженості електричного поля в газовому проміжку, де присутні фрагменти рідини. Саме на цьому аспекті і було зосереджено увагу. Окремі дослідження моделювання електричного поля бар'єрного розряду за умов наявності водяних крапель в газовому об'ємі були проведені в роботі [17]. Втім, отримані в цій праці результати стосуються досить обмеженого кола фізичних

закономірностей. Зокрема, показано якісний вплив окремої краплі води на локальне викривлення розподілу електричного поля, однак не подано чисельного оцінювання цього ефекту. Крім того, слід зауважити, що використана в дослідженні модель електродної системи на практиці є малоприматною. Вона не враховує присутність ансамблю крапель, які, як відомо, формуються у вигляді аерозолі, а також водяної плівки на поверхні електродів, що характерна для багатьох конфігурацій розрядних камер. Відповідно, просторовий розподіл електричного поля за таких умов може суттєво відрізнитися від ідеалізованої ситуації з однією краплею. Окремим обмеженням дослідження [17] є ігнорування впливу питомої електропровідності води, яка може змінюватись у широкому діапазоні в залежності від складу рідини. Цей фактор безпосередньо впливає як на електричну провідність плівки, так і на локальну деформацію поля у газовому об'ємі. У зв'язку з цим було проведено власне дослідження, в якому моделювався розподіл електричного поля з урахуванням присутності множинних крапель та водяної плівки на електродах, а також із врахуванням змін електропровідності води.

### **2.2.1. Розподіл електричного поля імпульсного бар'єрного розряду при наявності крапель та плівки води в розрядному проміжку.**

Для моделювання електромагнітних процесів було відтворено геометрію реальної експериментальної електродної системи. Такий підхід був обраний з метою забезпечення умов для подальшого обґрунтованого порівняння даних, отриманих під час експериментальних досліджень, із результатами теоретичних розрахунків. Схему конструкції використаної експериментальної електродної системи наведено на рисунку 2.1.

Газовий розрядний проміжок (7) в даній електродній системі формується двома паралельними пластинами: металевою (1) та склотекстолітовою (4). Ці пластини мають висоту 100 мм, ширину 300 мм та розташовані на відстані  $\delta=3,5$  мм одна від одної. Такий міжпластинний зазор ( $\delta$ ) є типовим для систем обробки води у вигляді плівки [18, 19] або крапель [20]. Вибір саме такої

відстані обґрунтований тим, що при  $\delta < 2,5$  мм зростає ймовірність замикання газового проміжку (7) водяними перемичками. З іншого боку, при  $\delta > 4$  мм для ініціювання імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) з достатньою інтенсивністю іонізації газового середовища потрібні значно вищі значення напруги (понад 30 кВ). Це є небажаним як з позиції енергоефективності, так і через ускладнення конструкції високовольтного джерела живлення.

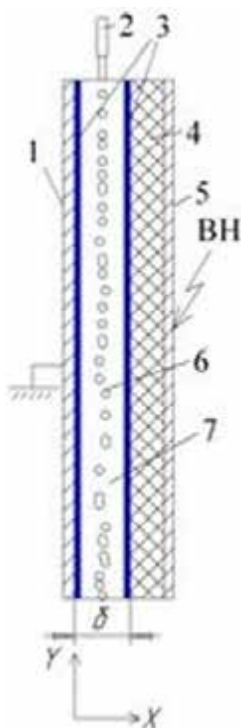


Рис. 2.1. Конструкція експериментальної електродної системи

Проведені дослідження продемонстрували, що при тиску води на вході в керамічні трубки, що становить 200 Па, вона витікає з них у вигляді суцільних струменів. Діаметр цих струменів становить 0,6 мм, а їхня довжина сягає приблизно 30 мм, після чого вони розпадаються на окремі краплі. Характерний діаметр утворених крапель оцінюється в 1 мм. Зафіксовано, що ці краплі рухаються вертикально вниз зі швидкістю близько 2 м/с, при цьому відстань між ними становить орієнтовно 2,5 мм. Під час свого руху частина крапель потрапляє на внутрішні стінки газового проміжку, які мають гідрофобні властивості. З метою запобігання утворенню на цих поверхнях великих скупчень води та виникненню водяних перемичок, здатних спричинити

електричне замикання проміжку, внутрішні поверхні електрода та діелектричного бар'єра були вкриті тонким шаром бавовняної тканини (товщиною приблизно 0,1 мм). Завдяки такому рішенню вода стікає по стінках газового проміжку у вигляді плівок (3). У нижній частині електродної системи товщина цих водяних плівок становить приблизно 0,15 мм.

Високовольтне живлення системи забезпечується спеціалізованим джерелом, що генерує уніполярні імпульси напруги. Тривалість фронту наростання цих імпульсів становить приблизно 40 нс, а їхня загальна тривалість – близько 80 нс. До конструктивних елементів джерела живлення належить магнітний ключ. Його функція полягає в тому, щоб негайно після проходження основного імпульсу струму, протягом приблизно 40 нс, здійснювати розрядження ємності, утвореної діелектричним бар'єром. В результаті дії магнітного ключа, напруга на електродній системі швидко спадає до нульового рівня. Цей нульовий потенціал підтримується протягом усього інтервалу між послідовними імпульсами, який становить орієнтовно 10 мс. Така специфіка роботи високовольтного джерела дає підстави розглядати кожен окремий імпульс напруги як ізольовану подію при проведенні теоретичних розрахунків.

Через співрозмірність постійної часу перехідного процесу встановлення електричного поля всередині краплі ( $\tau \sim \epsilon/\sigma$ ) і довжини імпульсу, коректний підхід до моделювання потребує врахування перехідного процесу [21]. Водяна крапля знаходиться в середовищі, електрофізичні властивості якого суттєво відрізняються від властивостей самої води. Незважаючи на це, характер розподілу електричного поля на поверхні краплі демонструє лише незначні відмінності, навіть якщо розглядати граничні випадки питомої електропровідності, що відповідають дистильованій та морській воді. Цей факт дозволяє зробити припущення, що для оцінки величини електричного поля в аналізованій системі можна обмежитись розглядом його розподілу в стаціонарному режимі. Для цього необхідно лише обрати частоту, яка є характерною для даного процесу.

Моделювання електричного поля при поданні імпульсу напруги на електродну систему (ЕС), рис.2.1., виконувалось з використанням програмного забезпечення FEMM методом скінчених елементів на основі рішення рівняння:

$$-(\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla^2\varphi = 0, \quad (2.1)$$

в якому  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  – відповідно питома електропровідність та діелектрична проникність середовища,  $\omega = 2\pi f$  – обертова частота,  $\varphi$  – електричний потенціал.

Імпульс напруги, що розглядається наближається за формою до позитивної півхвилі синусоїди з частотою  $f = 1/(2t_i)$ , де  $t_i$  – тривалість імпульсу. Тому обертова частота  $\omega$  в виразі (2.1) приймалась рівній величині  $\omega = \pi/t_i$ . Оскільки при експериментальних дослідженнях в цій роботі характерною величиною було  $t_i \sim 70$  нс, розрахунки проводилися при частоті  $f = 7,14$  МГц. У роботі [22] показано, що при такій заміні узгоджуються теоретичні і експериментальні результати дослідження імпульсних електромагнітних процесів.

Розрахунок параметрів електричного поля проводився в рамках двовимірної моделі, виходячи з припущення про нескінченні розміри електродів (за висотою та шириною). При цьому реальна форма імпульсу напруги  $u(t)$  (де  $t$  – час) апроксимувалася половиною синусоїдального сигналу  $U_m \sin(\omega t)$ , що діє в інтервалі часу  $0 \leq t \leq 0,5 / f$ . Тут  $U_m$  позначає амплітудне значення напруги, а частота  $f$  становить 7,14 МГц.

У процесі моделювання аналізувався вплив наступних факторів на напруженість електричного поля в електродній системі (ЕС): полярність імпульсу прикладеної напруги; питома електропровідність води ( $\sigma$ ), що варіювалася в діапазоні від  $2 \cdot 10^{-6}$  См/см (для дистильованої води) до  $1 \cdot 10^{-2}$  См/см (для морської води); діаметр водяних крапель ( $d_k$ ), який змінювався від

0,5 до 1,5 мм; та відстань ( $s$ ) між поверхнями сусідніх крапель, що знаходилася в межах від 0,5 до 4 мм.

З огляду на те, що протягом дії імпульсу напруги переміщення крапель було незначним (близько 0,1 мкм), у моделі вони розглядалися як стаціонарні (нерухомі). Додатково приймалися наступні припущення: всі краплі мають ідеально сферичну форму та розташовуються симетрично по центру газового проміжку. Розрахункові дослідження проводилися для амплітудного значення імпульсу напруги  $U_m = 3$  кВ. За такої напруги процеси іонізації повітря є незначущими, тому його питома електропровідність приймалася рівною нулю. Моделювання здійснювалося поетапно: на першому етапі розглядалася система з єдиною краплею в газовому проміжку, а на другому етапі враховувався вплив сусідніх крапель на розподіл поля.

На рис. 2.2 представлено розподіли напруженості електричного поля  $E(x)$  (крива 1) та потенціалу  $\phi(x)$  (крива 2) в міжелектродному проміжку. Ці дані отримані для умов, коли в газовому зазорі знаходиться одна крапля водопровідної води, що має питому електропровідність  $\sigma = 2 \cdot 10^{-4}$  См/см та діаметр 1 мм, і розраховані для моменту часу, коли імпульс напруги досягає свого амплітудного значення.

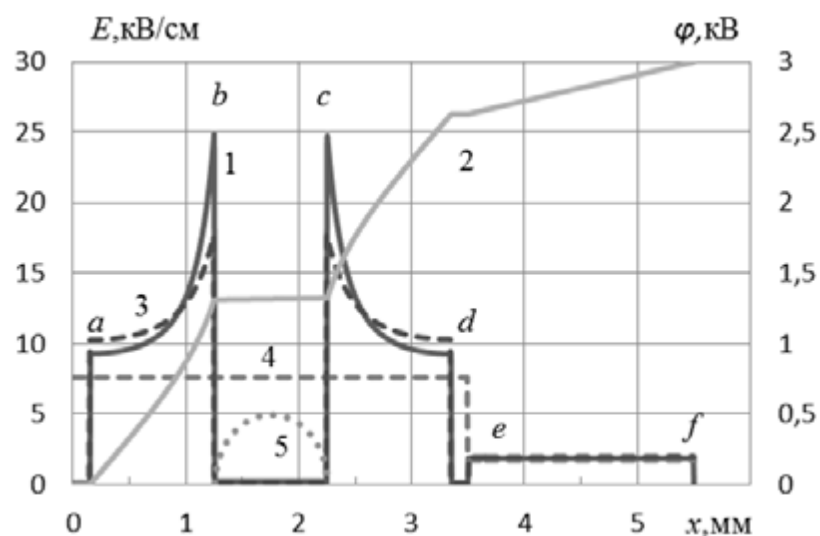


Рис. 2.2. Розподіли напруженості електричного поля  $E(x)$  та потенціалу  $\phi(x)$  в газовому проміжку електродної системи

Система координат на рисунку 2.2 орієнтована таким чином, що вісь  $Ox$  проходить через центр краплі, а відлік координати  $x$  починається від заземленого електрода. Верхня половина контуру краплі для наочності зображена пунктирною лінією (5). Як видно з представлених графіків, значення напруженості електричного поля ( $E$ ) всередині обох водяних плівок та в об'ємі самої краплі є дуже малими (менше  $0,1$  кВ/см). У прийнятому для рис. 2.2 масштабі ці значення візуально майже зливаються з віссю  $Ox$ . Однак на міжфазних границях «плівка-повітря» та «повітря-крапля» (позначені точками  $a, b, c, d$ ) спостерігаються різкі, стрибкоподібні зростання напруженості поля – приблизно на 2–3 порядки, досягаючи значень  $9$  та  $25$  кВ/см відповідно. При цьому важливо відзначити, що напруженість електричного поля на поверхні краплі є майже втричі вищою, ніж на поверхні водяної плівки. В межах товщини діелектричного бар'єра (між точками  $e$  та  $f$ ) напруженість поля залишається практично незмінною (близько  $0,25$  кВ/см) і є приблизно на порядок нижчою, ніж у газових проміжках. Аналіз розподілу потенціалу  $\phi(x)$  вздовж осі  $Ox$  (по довжині проміжку) показує, що падіння напруги в об'ємі водяних плівок та всередині краплі є мінімальним. Основна частина спаду напруги відбувається в повітряних зазорах (близько  $90\%$ ), і лише незначна частка (приблизно  $10\%$ ) припадає на діелектричний бар'єр.

Для порівняння, рис. 2.2 також демонструє розподіли  $E(x)$  для суцільного водяного струменя (діаметром  $1$  мм, пунктирна лінія 3) та за повної відсутності води (пунктирна лінія 4). Перехід від крапель до суцільного струменя якісно не змінює розподіл електричного поля в проміжку, однак знижує його напруженість на поверхні струменя приблизно на  $30\%$ . Це вказує на доцільність обробки води саме в крапельному стані для досягнення вищої  $E$  на межі розділу фаз. За відсутності води поле в проміжку стає однорідним і його напруженість значно (до 3 разів) нижча, ніж на поверхні краплі.

Моделювання електричного поля також показало, що варіації питомої електропровідності води та полярності імпульсу напруги практично не впливають (зміна  $< 1\%$ ) на розподіли  $E(x)$  та  $\phi(x)$ . Водночас абсолютні значення  $E$  та  $\phi$  лінійно залежать від амплітуди напруги  $U_m$  (за умови неврахування процесів іонізації газу).

На рис. 2.2 показано, напруженість електричного поля ( $E$ ) в газовому проміжку є максимальною у крайніх горизонтальних точках краплі (b та c). Однак, при русі вздовж її вертикального контуру (від точки b до c), значення  $E$  на поверхні краплі змінюється. Цю динаміку для краплі діаметром  $d_k=1,5$  мм ілюструє залежність  $E(l)$  на рис. 2.3, де  $l$  – криволінійна координата, що відраховується від точки b вздовж поверхні перерізу краплі в площині xOy.

З рис. 2.3 видно, що при  $l=0,78$  мм (точка, що відповідає перетину вертикальної осі симетрії з контуром краплі) напруженість  $E$  досягає мінімального значення, після чого знову зростає. Моделювання показало, що практично вздовж усієї координати  $l$  вектор  $E$  спрямований переважно нормально до поверхні краплі. Винятком є лише вузька ділянка при  $l \approx 0,76-0,80$  мм (у верхній та нижній частинах краплі, а також у зонах горизонтального перерізу, найбільш віддалених від стінок), де з'являється тангенціальна складова ( $\sim 0,1$  кВ/см), яка в цій локальній зоні переважає нормальну.

На рис. 2.4 показано залежність максимальної напруженості електричного поля на поверхні крапель ( $E_m$ ) від їхнього діаметра ( $d_k$ ). Ця залежність демонструє, що зі збільшенням  $d_k$  значення  $E_m$  дещо зростають (приблизно на 10%). Це можна пояснити тим, що збільшення  $d_k$  зменшує сумарну довжину газового проміжку, на яку припадає основна частина напруги  $U_m$ , внаслідок чого напруженість  $E_m$ , яка пропорційна  $U_m/d_k$ , зростає.

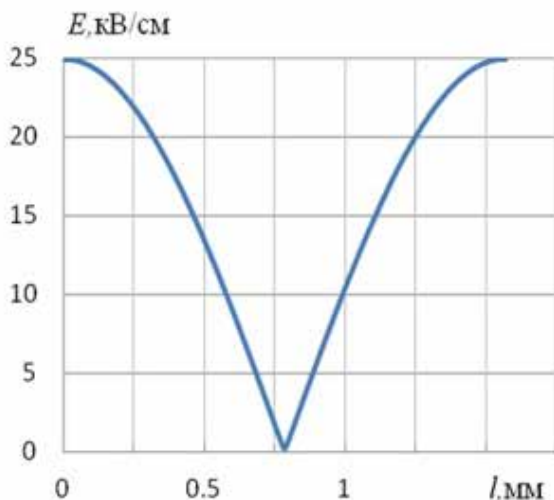


Рис 2.3. Залежність напруженості електричного поля  $E$  від  $l$

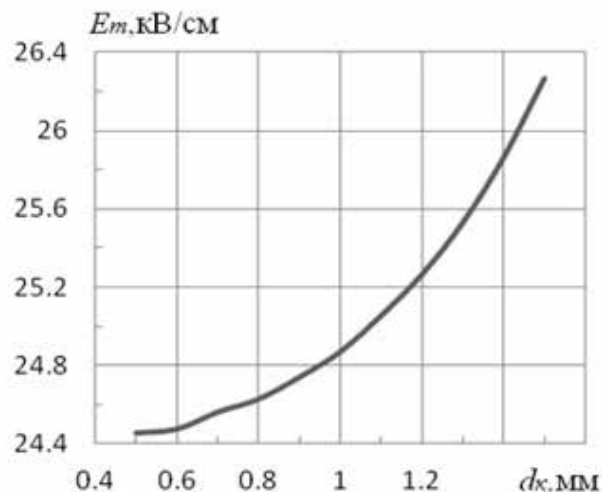


Рис. 2.4. Залежність напруженості електричного поля  $E$  від діаметра краплі  $d_k$

Присутність сусідніх крапель спричиняє зниження максимальної напруженості електричного поля ( $E_m$ ) на поверхні аналізованої краплі. Це явище ілюструє рис. 2.5 (для крапель діаметром  $d_k=1$  мм), де крива 1 відображає залежність  $E_m$  від відстані  $s$  (в діапазоні 0,5–4 мм) між найближчими точками поверхонь вертикально розташованих сусідніх крапель. Для порівняння, пунктирна лінія 2 на цьому ж рисунку показує значення  $E_m$  для ізольованої краплі аналогічного діаметра. Вплив сусідніх крапель є найбільш помітним (спричиняючи зниження  $E_m$  до 10%) за умови, що відстань  $s$  менша за 1,5 мм. Натомість, при  $s>3$  мм цей вплив стає незначним, зумовлюючи зміну  $E_m$  лише на приблизно 0,5%. Таким чином, аналіз залежності  $E_m(s)$  дозволяє зробити припущення, що краплі, які генеруються сусідніми соплами, розташованими на відстані 3,5 мм одне від одного, матимуть слабкий взаємний вплив на величину  $E_m$ . На рисунку 2.6 представлено розподіл напруженості електричного поля  $E(y)$  вздовж вертикальної осі  $y$  (де координата  $y$  відлічується від верхньої точки поверхні краплі). Ці розподіли показані для трьох значень відстані  $s$  між краплями: 2,0 мм (крива 1), 2,8 мм (крива 2) та 4,0 мм (крива 3). Представлені дані демонструють, що в центральній області між краплями напруженість поля

досягає локального максимального значення, яке позначено як  $E_{m1}$ . Величини  $E_{m1}$  збільшуються зі зростанням відстані  $s$ . Водночас, ці значення  $E_{m1}$  є приблизно в 2,5 рази меншими, ніж відповідні максимальні значення  $E_m$  на поверхні краплі (при однакових значеннях  $s$ ). Просторова протяжність зони, в якій напруженість поля  $E$  близька до  $E_{m1}$ , розширюється зі збільшенням відстані  $s$  між краплями.

Таким чином, наявність крапель води суттєво підвищує напруженість електричного поля на їх наближених до електродів поверхнях, а присутність водяної плівки на електродах не має негативного впливу на розподіл напруженості електричного поля.

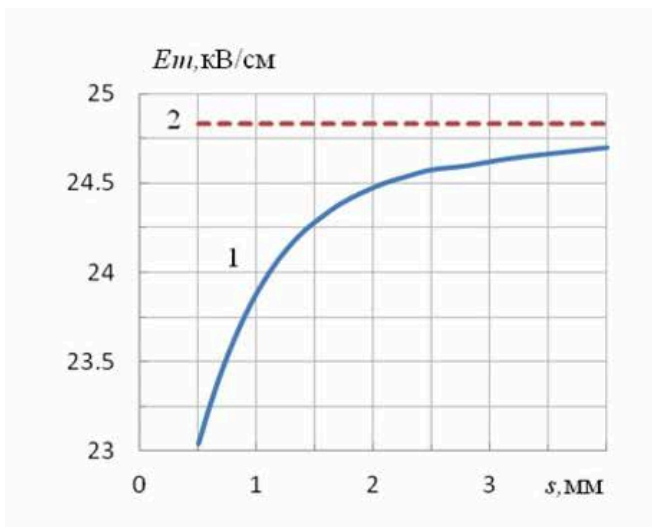


Рис. 2.5 Залежність напруженості електричного поля  $E$  від відстані між найближчими точками (по вертикалі) на поверхнях сусідніх крапель  $s$

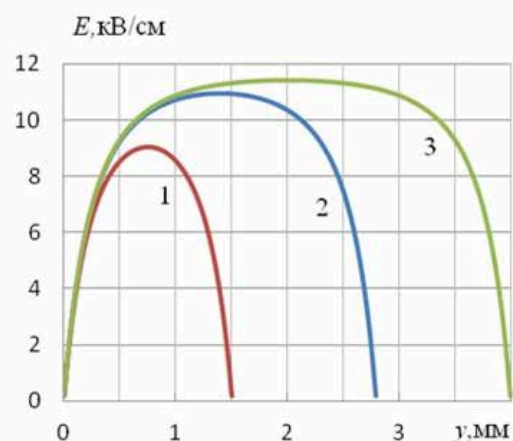


Рис. 2.6 Розподіли напруженості електричного поля  $E$  вздовж вертикальної осі  $y$  (відлік координати  $y$  починається від найвищої точки на поверхні краплі) для випадків  $s = 2,0$ ; 2,8 та 4,0 мм

### 2.3. Створення просторово однорідного імпульсного бар'єрного розряду при наявності води в розрядному проміжку

Імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) може реалізовуватись у двох просторових формах: неоднорідній (ниткоподібній) та однорідній (дифузній). Для першої характерним є утворення вузьких локалізованих каналів провідності — так званих «ниток», у яких відбувається зосередження основної частини енергії розряду. Найімовірнішим механізмом їх виникнення є локальне накопичення заряджених частинок з подальшим запуском електронних лавин, що переходять у стримерні структури. Основною проблемою ниткоподібної форми є нерівномірний розподіл енергії, що призводить до локального перегріву газу в каналах розряду. Такий тепловий ефект, з одного боку, спричиняє втрати енергії, які не беруть участі в генерації активних частинок, а з іншого — знижує ефективність утворення окислювальних агентів (гідроксильних радикалів, озону, перекису водню), які є ключовими чинниками руйнування органічних забруднювачів. На противагу цьому, однорідна форма ІБР (ОІБР) забезпечує рівномірніший розподіл електричного поля в об'ємі розрядного проміжку та утворення плазми без чітко виражених ниткоподібних структур. Це дозволяє уникнути локального нагріву, сприяє більш ефективній генерації активних частинок і, як наслідок, підвищує результативність обробки води. Отже, можна стверджувати, що ОІБР є більш придатною формою розряду для водоочищення, ніж ниткоподібна. Водночас у наявних дослідженнях, що стосуються дії ІБР на поверхню води, форма реалізованого розряду не завжди чітко ідентифікується. Створення однорідного розряду в атмосферному повітрі над водною поверхнею супроводжується низкою ускладнень. Серед них — деформації поверхні рідини під дією імпульсів напруги [23], підсилення локальної напруженості електричного поля на межах крапель води, а також інтенсивна хімічна активність з участю метастабільних молекул азоту ( $N_2$ ) та водяної пари [24]. З огляду на це, доцільним є поглиблене дослідження умов формування ОІБР у присутності крапельно-плівкової водної фази в розрядному проміжку, а також виявлення ключових факторів, які впливають на однорідність розряду та стабільність плазмових утворень у таких умовах.

### 2.3.1. Створення однорідного імпульсного бар'єрного розряду при наявності плівки води на електродах.

У роботі [25] представлено результати експериментальних досліджень, присвячених вивченню можливості формування однорідного імпульсного бар'єрного розряду (ОІБР) над поверхнею водяної плівки в атмосферному повітрі, а також умов його стійкого існування. Автори показали, що за наявності фронту імпульсів напруги тривалістю близько 15 нс і амплітуд електричного поля понад 75 кВ/см, існує можливість стабільного утворення ОІБР над водною плівкою при газовому проміжку в межах 1–4 мм.

Дослідження встановлюють, що перехід ОІБР у ниткоподібну (неоднорідну) форму (НІБР) відбувається під впливом кількох факторів: частоти повторення імпульсів  $f$ , величини газового проміжку  $\delta$ , тривалості дії розряду  $\tau$ , а також товщини плівки води  $\delta_p$ . Зі зростанням частоти  $f$  зменшується інтервал між імпульсами, що ускладнює нейтралізацію залишкових зарядів на діелектричному бар'єрі. Ці заряди, у свою чергу, сприяють втраті однорідності електричного поля. Таким чином, з одного боку, підвищення частоти покращує умови завдяки залишковій іонізації повітря, а з іншого — спричиняє накопичення зарядів та неоднорідність густини газу, що веде до переходу в НІБР [25]. Загалом, чим менший розрядний проміжок, тим сприятливіші умови для утворення ОІБР. Однак при значеннях  $\delta \leq 2\text{--}3$  мм може виникати явище перемикання проміжку водяними містками (наприклад, за рахунок стійких мікростовпчиків рідини), що призводить до втрати енергії на непродуктивні процеси. Важливою змінною також є товщина водяної плівки: як показано в [25], при  $\delta_p \approx 10$  мкм ниткоподібні структури з'являються вже при  $f \approx 100$  Гц. Їх утворення пояснюється локальними нерівностями поверхні — зокрема мікроступами, що виникають через шорсткість підкладки (наприклад, паперу).

Крім того, зі збільшенням довжини газового проміжку в межах 1–4 мм спостерігається зменшення граничної частоти повторення імпульсів, при якій зберігається однорідність розряду — від близько 500 Гц до 50 Гц. Гранична

частота також знижується зі зростанням часу дії розряду, який при підвищених частотах і більших проміжках може досягати десятків секунд. Узагальнюючи результати досліджень, можна стверджувати, що формування однорідного імпульсного бар'єрного розряду в присутності водяної плівки в атмосферному повітрі є цілком можливим, однак вимагає точного дотримання ряду параметрів, зокрема товщини води, тривалості імпульсу, частоти повторення та розмірів газового проміжку.

### **2.3.2. Однорідний імпульсний бар'єрний розряд при плівково-крапельному русі води**

Один із висновків, зроблених у першому розділі, полягає в тому, що найбільш ефективною є обробка води в крапельному або плівковому стані. Це, у свою чергу, зумовлює певні обмеження щодо геометрії та орієнтації електродної системи. Зокрема, виникає необхідність у вертикальному розміщенні електродів, що створює додаткові труднощі для підтримання однорідної форми імпульсного бар'єрного розряду (ОІБР).

Хоча плазма ІБР за своєю природою є неізотермічною, навіть за умови однорідності розряду довготривала робота установки призводить до поступового підвищення температури газової фази. У разі неоднорідного розряду це нагрівання відбувається локально — в зонах формування ниткоподібних структур, однак навіть за умов однорідного розряду підвищення температури може сприяти порушенню однорідності й утворенню мікроканалів. На відміну від горизонтального компонування, при вертикальному розміщенні електродів виникає конвективне підняття тепла вгору, що знижує ефективність природного охолодження і посилює термічне навантаження в зоні розряду. З огляду на це, виникає потреба в дослідженні чинників, які дозволяють створити і стабільно підтримувати ОІБР, особливо у випадках, коли обробка води здійснюється в краплинно-плівковому режимі. При цьому електричні параметри системи мають відповідати умовам генерації ефективного розряду:

напруженість електричного поля — у межах десятків кіловольт на сантиметр, а густина струму — в діапазоні одиниць ампер на квадратний сантиметр.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням електродної системи, схематично представленої на рис. 2.7. Розряд відбувався в повітряному проміжку 8, крізь який проходив потік води. Газовий проміжок формувалася між алюмінієвою пластиною (1) та склотекстолітовою пластиною (5), що виконувала роль діелектричного бар'єра. Остання мала товщину 2 мм. На її зовнішній поверхні було щільно закріплено високовольтний електрод (6), геометричні параметри якого подано на рис. 2.7. Площа активної поверхні електрода становила  $18 \text{ см}^2$ , діелектрична проникність бар'єру —  $\epsilon_r = 4,2$ , а його ємність —  $C = 50 \text{ пФ}$ . Відстань  $\delta$  між електродами задавалася за допомогою чотирьох дистанційних вставок (4), розташованих по кутах конструкції, кожна з яких мала товщину 3,5 мм. Такий розмір було обрано виходячи з практичних міркувань: як показують дослідження, ефективна обробка плівкової води в ІБР досягається при газовому проміжку в межах 3–4 мм.

Подавання води до повітряного проміжку здійснювалося через п'ять керамічних капілярних трубок (2), кожна з яких мала довжину 6 мм і внутрішній діаметр 0,6 мм. Відстань між осями трубок становила 3,5 мм, а відстань від нижнього краю трубок до верхньої межі електродної системи — 15 мм. Тиск подачі води на вході до трубок підтримувався на рівні близько 200 Па. За таких умов вода витікала з отворів суцільними струменями діаметром приблизно 0,6 мм і довжиною до 20 мм, після чого ці струмені диспергувалися в окремі краплі (7) діаметром близько 1 мм, які рухалися вертикально вниз із швидкістю  $\sim 1 \text{ м/с}$ .

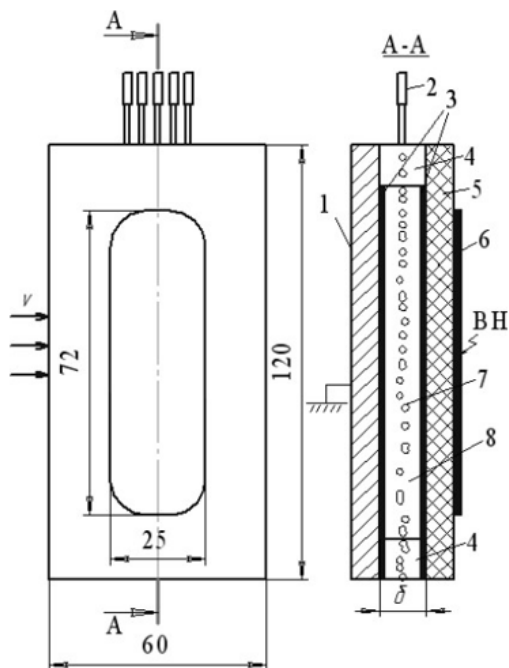


Рис. 2.7. Конструкція електродної системи

Загальна витрата води через усі трубки становила 150 мл/хв. Частина крапель під час руху осідала на стінки газового проміжку, які були виконані з гідрофобних матеріалів. Щоб уникнути утворення на стінках великих крапель та запобігти перемиканню електричного проміжку, внутрішні поверхні електрода 1 та діелектричного бар'єра 5 було вкрите тонким ( $\sim 0,15$  мм) шаром бавовняної тканини. Це забезпечувало формування однорідної плівки води (3) товщиною приблизно 0,1 мм, яка рівномірно стікала по поверхні. Конструкція електродної системи також передбачала можливість подачі поперечного повітряного потоку в газовий проміжок для дослідження його впливу на характер ІБР. Швидкість продувки позначалася як  $v$  (див. рис. 2.6). Характеристики руху крапель, а також візуальна оцінка однорідності розряду проводилися шляхом фотозйомки із використанням цифрової камери Canon A630. Зйомки виконувалися за умов максимальної чутливості ISO 800 та експозиції  $\tau$ , що дозволяла фіксувати світіння кількох десятків імпульсів (1–4). Збільшення експозиції до сотень імпульсів призводило до надмірного інтегрального світіння, що ускладнювало інтерпретацію форми розряду. У

таких умовах візуальне розрізнення між однорідною та неоднорідною формою ІБР було можливим навіть неозброєним оком.

Як джерело живлення використовувався генератор, здатний створювати уніполярні імпульси напруги з амплітудою до 30 кВ, тривалістю  $\sim 100$  нс та фронтом зростання  $\approx 35$  нс. Реєстрація осцилограм напруги та струму здійснювалася за допомогою цифрового осцилографа TDS 1012, до якого підключалися датчик напруги P1015 та датчик струму P6021. Вказані пристрої мають смуги пропускання 100 МГц, 60 МГц та 100 МГц відповідно.

Під час експериментів встановлено, що характерна тривалість фронтів напруги та струму становила близько 35 нс, що відповідає фронтам синусоїдальної напруги з частотою приблизно 7,14 МГц. Ця частота на порядок нижча за межу пропускання вимірювальних приладів, що гарантує достовірність осцилографічних даних, отриманих у ході дослідження.

Типові осцилограми напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$  ІБР через електродну систему показано на рис. 2.8 (частота повторення імпульсів  $f=100$  Гц).

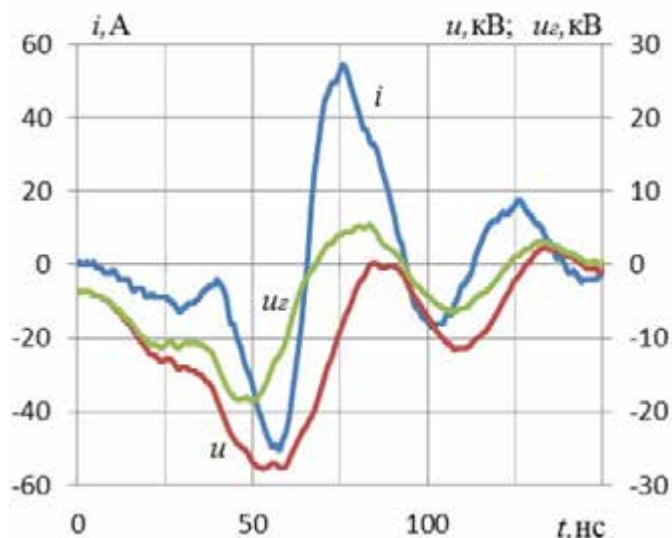


Рис. 2.8. Типові осцилограми напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$  ІБР через електродну систему

Як видно з рис. 2.8, імпульс напруги, що характеризується фронтом тривалістю приблизно 40 нс, досягає свого максимального значення  $U_m = 27,6$

кВ. Імпульс струму при цьому складається з двох основних фаз: пряма складова у діапазоні часу  $t = 0 - 65$  нс з амплітудою  $I_{m1} = 47$  А та зворотна складова в інтервалі  $t = 65 - 90$  нс з амплітудою  $I_{m2} = 52$  А. Остання виникає внаслідок розрядження ємності діелектричного бар'єра через магнітний ключ, що входить до складу джерела живлення. На тому ж рисунку показано також залежність напруги на газовому проміжку  $u_r(t)$  від часу. Ця функція визначалась як різниця між напругою на електродній системі  $u(t)$  та напругою на діелектричному бар'єрі  $u_6(t)$ . Останню обчислено згідно з методикою, наведеною в роботі [26], яка базується на аналізі ємнісного поділу потенціалів в електродній системі з урахуванням геометричних та електричних параметрів бар'єра. Застосовуючи ту саму методику [26], було розраховано й енергію, що виділяється в газовому проміжку за один імпульс ІБР, яка склала  $W_r = 17$  мДж.

Методика розрахунку полягає в тому, що спочатку визначалась зміна напруги в часі  $t$  на бар'єрах

$$u_{\delta} = C_{\delta}^{-1} \int_0^t i dt + u_0, \quad (2.2)$$

та газових проміжках

$$u_z = u - u_{\delta}, \quad (2.3)$$

Завдяки наявності магнітного ключа, інтегрованого на виході імпульсного генератора, діелектричні бар'єри на поверхні електродів виявляються повністю розрядженими до моменту початку кожного наступного імпульсу струму. Відповідно, початкове значення напруги на цих бар'єрах  $u_0 = 0$ . Після цього відповідно до виразу

$$W_z = \int_0^{\tau} i u_z dt, \quad (2.4)$$

знаходилась енергія, що виділялась в газових проміжках за час  $\tau$  імпульсу. Повна енергія імпульсу  $W_i$ , що надходить до розрядної камери, (з урахуванням діелектричних втрат в бар'єрах та струму витоку у вологій електродній системі) знаходилася за загальноприйнятим виразом

$$W_i = \int_0^{\tau} i u dt, \quad (2.5)$$

При досягненні амплітудного значення напруги генератора  $U_{gm}=17,8$  кВ (у момент часу  $t=47$  нс), напруженість електричного поля в газовому зазорі сягає  $E_{gm} = U_{gm}/\delta = 59,3$  кВ/см. У цьому виразі  $\delta_1=3$  мм представляє собою ефективну довжину газового проміжку, розраховану з урахуванням товщини тканинного покриття та водяних плівок, що знаходяться на поверхнях електрода та діелектричного бар'єра. Варто зазначити, що таке значення напруженості поля приблизно вдвічі перевищує порогове значення, необхідне для початку інтенсивної іонізації повітряного середовища. За цих умов середня енергія електронів ( $T_e$ ) оцінюється величиною 3,7 еВ, що є вищим за енергетичний бар'єр, потрібний для ініціації плазмохімічних реакцій. Амплітудне значення густини струму, усереднене по площі електроду  $S$ , в момент, коли миттєве значення струму  $i(t)$  досягає свого максимуму  $I_{m1}$ , становить  $j_m = I_{m1}/S = 2,6$  А/см<sup>2</sup>. За таких розрядних умов середня концентрація електронів ( $N_e$ ) в газовому середовищі сягає значення  $8,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Ця величина концентрації електронів є характерною для стримерної форми бар'єрного розряду (БР), що розвивається в атмосферному повітрі.

У разі, коли вода не подається безпосередньо до повітряного проміжку, але його стінки залишаються зволженими, основні параметри імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) зазнають незначних змін: амплітуда струму  $I_{m1}$  зростає

приблизно на 5%, тоді як амплітуда напруги  $U_{m1}$  практично не змінюється. Водночас, при повному висиханні газового проміжку, ІБР стає нестабільним. Найімовірнішою причиною цього є накопичення залишкового електричного заряду на поверхні діелектричного бар'єра, який не встигає повністю нейтралізуватись протягом паузи між імпульсами струму.

Форма розряду значною мірою залежить від частоти повторення імпульсів  $f$  та наявності крапельно-плівкового потоку води в розрядному проміжку. Зі зростанням частоти розряд набуває все більш вираженої неоднорідності. Для експериментальних умов, описаних у роботі, максимальна частота, за якої ІБР залишається однорідним, становить приблизно  $fm \approx 300$  Гц. Це підтверджується фотознімком на рис. 2.9а, зробленим при  $f = 294$  Гц, на якому спостерігається рівномірне світіння розряду. При подальшому підвищенні частоти, зокрема до  $f=500$  Гц, у розрядному проміжку з'являються характерні ниткоподібні утворення, що добре помітні на рис. 2.9b, особливо в центральній частині проміжку. Така структура є ознакою неоднорідного ІБР. Проте, якщо до електродної системи ввести поперечну продувку повітрям зі швидкістю  $v \approx 0,6$  м/с, розряд знову набуває однорідної форми навіть при  $f = 500$  Гц. Це чітко видно на рис. 2.9с. Такий ефект пояснюється покращенням умов охолодження та видаленням залишкових іонів і метастабільних частинок з міжелектродного простору.

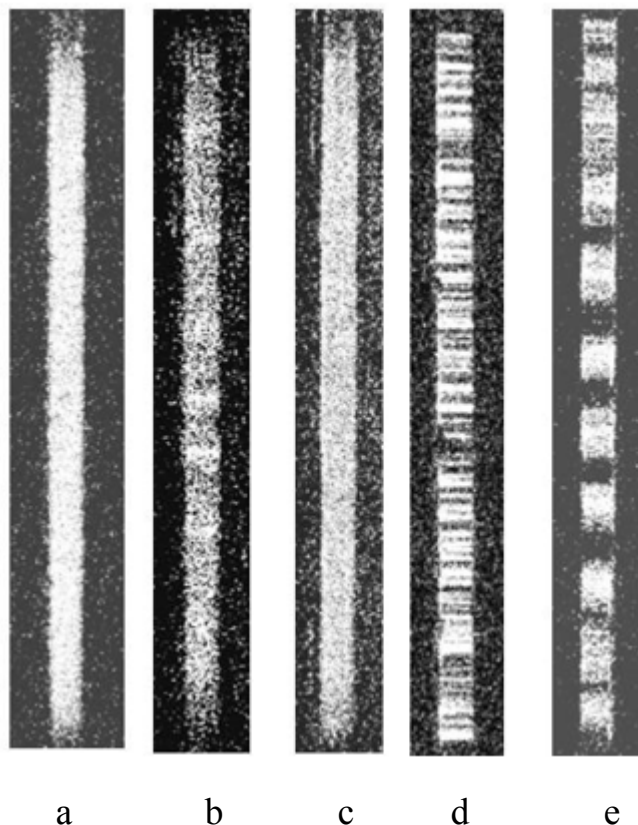


Рис. 2.9. Фотографії форми розряду в залежності від частоти і наявності в міжелектродному проміжку води (а -  $f=294$  Гц; б -  $f=500$  Гц; в -  $f=500$  Гц,  $v \sim 0,6$  м/с; д, е -  $f=300, 500$  Гц, при відсутності води)

Вплив продувки газового проміжку, що сприяє його охолодженню, свідчить про те, що одним із ключових чинників, який зумовлює перехід імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) з однорідної у неоднорідну форму при підвищенні частоти, є локальний нагрів газової фази. Орієнтовні розрахунки показують, що при  $f=500$  Гц середня об'ємна густина енергії, яка виділяється в розрядному проміжку, може досягати  $\sim 1$  Дж/см<sup>3</sup>, що здатне викликати підвищення температури газу на десятки, а подекуди й сотні градусів. За відсутності руху води в газовому проміжку, розряд набуває неоднорідної структури навіть при відносно невеликих частотах, наприклад,  $f=300$  Гц, як зображено на рис. 2.9d, і навіть при низьких частотах ( $\sim 10$  Гц), що спостерігається візуально неозброєним оком. При збільшенні частоти понад 300 Гц, зокрема при  $f=500$  Гц, утворюються локальні світні зони (рис. 2.9e), які

при частотах вище  $\sim 400$  Гц починають переміщуватись вгору зі швидкістю близько  $0,2$  м/с. Це дозволяє зробити припущення, що неоднорідність ІБР за відсутності води пов'язана саме з відсутністю тепловідведення, який зазвичай забезпечується потоком рідини.

В цілому, експериментальним шляхом визначено умови, при яких ІБР має однорідну форму в розрядному проміжку з довжиною  $3$  мм і його електричні показники є достатніми для ефективної обробки води (амплітуда напруженості електричного поля в газовому проміжку  $\approx 60$  кВ/см, частота повторення імпульсів до  $300$  Гц, амплітудна густина струму –  $2,6$  А/см<sup>2</sup>, концентрація і середня енергія електронів відповідно –  $8,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> та  $3,7$  еВ), а саме:

1. Поверхні електродів повинні бути покриті водяною плівкою. У випадку її відсутності навіть при низькій частоті ( $\sim 10$  Гц) ІБР набуває неоднорідної структури.
2. Наявність краплинного потоку води в розрядному проміжку забезпечує охолодження газової фази та запобігає втраті однорідності розряду при частотах до  $300$  Гц.
3. Поперечна продувка повітрям дозволяє суттєво підвищити граничну частоту збереження однорідної форми розряду. Зокрема, при швидкості повітря  $v \approx 0,6$  м/с гранична частота перевищує  $500$  Гц.

Оскільки в рамках дослідження вдалося реалізувати стійкий однорідний імпульсний бар'єрний розряд, подальшим кроком є оцінка впливу його однорідності на ефективність безпосередньої експериментальної обробки води. При цьому, спираючись на результати моделювання ІБР, необхідно сформулювати вимоги до електродної системи розрядної камери. Особливу увагу слід приділити тому, щоб експериментальна установка була спроектована з урахуванням можливості масштабування для промислового використання.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ В РОСЛИННИЦТВІ

Проведені дослідження засвідчили, що для оцінювання впливу електричної обробки водних розчинів на зміну їх фізико-хімічних параметрів найдоцільніше застосовувати потенціометричні методи вимірювання. Їх основною перевагою є використання первинних вимірювальних перетворювачів з електричним вихідним сигналом, що дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів без суттєвого впливу зовнішніх електромагнітних збурень на зразок. Суттєвою перевагою цього методу є висока чутливість до змін таких характеристик, як водневий показник (рН) та окисно-відновний потенціал (ОВП), зміна яких після електричної обробки значно перевищує допустиму похибку приладів. Найбільш придатними для використання є рН-метри, оскільки рН є інтегральним параметром, що узагальнено відображає стан розчину в цілому. У свою чергу, електроди для вимірювання ОВП характеризуються нестабільністю потенціалу, зокрема його дрейфом і тривалим часом стабілізації — до 15–20 хв, що ускладнює оперативне вимірювання.

Для індикації впливу електричної обробки на водний розчин використовується іономір, за допомогою якого вимірюються значення рН та ОВП до і після експозиції в полі бар'єрного розряду. Порівняння отриманих результатів дозволяє зробити висновки щодо ефективності впливу розряду на зміну хімічного стану розчину.

### **3.1 Теоретичні дослідження зміни параметрів води та розчинів мінеральних добрив при їх обробці в полі імпульсного бар'єрного розряду**

Проведені пошукові дослідження показали, що при обробці води та розчинів мінеральних добрив в полі бар'єрного розряду змінюється їх рН і

окислювально-відновний потенціал, що обумовлено зміною кінетики хімічних реакцій.

При хімічних реакціях зміна концентрації речовини:

$$dC_i = \omega dt, \quad (3.1)$$

де  $C_i$  – концентрація речовини;

$\omega$  – швидкість хімічної реакції;

$t$  – час.

Швидкість хімічної реакції:

$$\omega = k \prod_{\{i=1\}}^{\alpha} C_i^{|\gamma_i|}, \quad (3.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт швидкості;

$\gamma_i$  – стехіометричні коефіцієнти реакції.

При обробці водного розчину в полі бар'єрного розряду концентрації реагентів не змінюються, тому зміна концентрації продуктів реакції прямо пропорційна коефіцієнту швидкості.

Згідно з рівнянням Вант-Гоффа-Арреніуса

$$k = K_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right), \quad (3.3)$$

де  $K_0$  – передекспоненціальний множник;

$E_a$  – енергія активації;

$R$  – універсальна газова стала;

$T$  – температура.

Прологарифмувавши даний вираз, отримаємо:

$$\lg k = \lg k_0 - \frac{E_a}{RT}, \quad (3.4)$$

Згідно з теорією зіткнення

$$k_0 = Z e^{\frac{S_a}{R}}, \quad (3.5)$$

де  $Z$  - коефіцієнт пропорційності;

$S_a$  - ентропія активації.

Згідно з теорією перехідного стану

$$k_0 = \frac{kT}{h} e^{\frac{\Delta S_0}{R}}, \quad (3.6)$$

де  $\Delta S_0$  - стандартна ентропія активації,

$k$  - стала Больцмана;

$h$  - стала Планка.

Величина рН розчину:

$$pH = -\lg a_{H^+} = -\lg f C_{H^+}, \quad (3.7)$$

де  $a_{H^+}$  - активність іонів водню;

$f$  - коефіцієнт активності.

Так як зміна концентрації іонів водню  $C_{H^+}$  при обробці водного розчину в полі бар'єрного розряду пропорційна коефіцієнту швидкості реакції, то величина рН пропорційна десятковому логарифму коефіцієнта швидкості:

$$\Delta pH = A_0 \lg k, \quad (3.8)$$

де  $A_0$  – коефіцієнт.

Тоді при сталій температурі розчину згідно (3.3.), (3.4), (3.5) зміна величини рН:

$$\Delta pH = A_1 \Delta E, \quad (3.9)$$

де  $\Delta E$  - зміна енергії взаємодії.

Аналогічно для окислювально-відновних потенціалів:

$$\Delta E = B_1 \Delta E, \quad (3.10)$$

Під час дії бар'єрного розряду в газовому середовищі відбувається генерація негативно заряджених іонів, які під дією силового поля спрямовано рухаються до поверхні водного розчину, досягають її та частково проникають у рідинну фазу.

$$dn/dt = SDdC/dx, \quad (3.11)$$

де  $dn/dt$  - кількість речовини, дифундує через поверхню  $S$  в напрямку  $x$ ;

$D$  - коефіцієнт дифузії.

Гradient концентрації в дифузійному шарі постійний, тому

$$dn/dt = (SD/\delta)(C_0 - C_n), \quad (3.12)$$

де  $\delta$  - товщина дифузійного шару Нернста, яка залежить від властивостей розчинника і розчиненої речовини, швидкості змішування та ін.,

$C_0$  – концентрація речовини в об'ємі;

$C_n$  - концентрація речовини біля поверхні.

Так як

$$C_0 = n/V, \quad (3.13)$$

де  $V$  - об'єм розчину,  
а коефіцієнт дифузії

$$\beta = D/\delta, \quad (3.14)$$

то

$$dn/dt = S\beta \left( \frac{n}{V} - C_n \right), \quad (3.15)$$

Звідки маємо

$$\frac{H}{\beta} \frac{dn}{dt} + n = VC_n, \quad (3.16)$$

де  $H$  - товщина шару розчину.

Розв'язавши дане диференціальне рівняння, отримаємо

$$n = VC_n \left( 1 - e^{-\frac{\beta t}{H}} \right), \quad (3.17)$$

$$VC_n = A_2 n_0, \quad (3.18)$$

де  $n_0$  - кількість аероіонів, які утворилися на бар'єрному електроді;

$A_2$  – коефіцієнт пропорційності.

Тоді

$$n = A_2 n_0 \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{H}}\right), \quad (3.19)$$

Кількість аероіонів, отримана з бар'єрного дротяного електрода:

$$n_0 = \frac{\varepsilon_0 \pi^2 l \lambda U (U - U_0)}{h^2 \ln(2h/r_0) e}, \quad (3.20)$$

де  $\varepsilon_0$  - електрична стала;

$l$  - довжина електрода;

$\lambda$  - рухливість негативних іонів;

$U$  - напруга між електродами;

$U_0$  - початкова напруга бар'єрного розряду;

$h$  - відстань від бар'єрного електрода до площини;

$r_0$  - радіус бар'єрного електрода;

$e$  - заряд аероіона.

Внаслідок поглинання розчином аероіонів змінюється енергія взаємодії:

$$\Delta E = A_3 n, \quad (3.21)$$

де  $A_3$  - коефіцієнт, який залежить від хімічного складу розчину.

Тоді з урахуванням (3.19), (3.20)

$$\Delta E = A_2 A_3 \frac{\varepsilon_0 \pi^2 l \lambda U (U - U_0)}{h^2 \ln(2h/r_0) e} \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{H}}\right), \quad (3.22)$$

$$\Delta pH = A_1 A_2 A_3 \frac{\varepsilon_0 \pi^2 l \lambda U (U - U_0)}{h^2 \ln(2h/r_0) e} \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{H}}\right), \quad (3.23)$$

$$\Delta pH = \frac{AU(U-U_0)}{h^2 \ln(2h/r_0)} \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{H}}\right), \quad (3.24)$$

Струм бар'єрного розряду:

$$I = \frac{\varepsilon_0 \pi^2 \lambda U(U-U_0)}{h^2 \ln(2h/r_0)}, \quad (3.25)$$

тому

$$\Delta pH = A^1 I \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{H}}\right), \quad (3.26)$$

Аналогічно для окислювально-відновних потенціалів:

$$\Delta E = \frac{BU(U-U_0)}{h^2 \ln(2h/r_0)} \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{H}}\right), \quad (3.27)$$

або

$$\Delta E = B^1 I \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{H}}\right), \quad (3.28)$$

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що зміна рН та окисно-відновного потенціалу (ОВП) водних розчинів у процесі їх обробки в полі бар'єрного розряду зумовлюється рядом факторів, серед яких основними є: напруженість електричного поля, тривалість впливу, а також хімічний склад розчину, зокрема концентрація та співвідношення наявних іонів.

Встановлено, що зазначені зміни мають пряму пропорційність до квадрата прикладеної напруги та обернену пропорційність до квадрата відстані від бар'єрного електрода до площини розчину. Динаміка зміни рН та ОВП у часі

підпорядковується експоненціальному закону, що свідчить про наявність релаксаційних процесів у системі.

Водночас, слід зазначити, що частина коефіцієнтів, які входять до аналітичних залежностей, не піддається аналітичному визначенню через складність фізико-хімічних взаємодій у системі «газ–рідина». Це вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень для уточнення емпіричних параметрів і калібрування моделі.

### **3.2 Експериментальні дослідження зміни параметрів води і розчинів мінеральних добрив при їх обробці в полі бар'єрного розряду**

Експериментальні дослідження впливу бар'єрного розряду на параметри води та водних розчинів мінеральних добрив проводилися на спеціально розробленій лабораторній установці. У рамках дослідів вивчалась динаміка зміни водневого показника (рН) та окисно-відновного потенціалу (ОВП) розчину залежно від тривалості обробки, величини прикладеної напруги та геометрії розрядної системи. На рис. 3.1 представлено зміну рН води після експозиції в полі бар'єрного розряду протягом 1, 2 та 3 хвилин за умови, що відстань між бар'єрним електродом і поверхнею розчину становить 3 см. Відповідно, рис. 3.2 ілюструє зміну ОВП за аналогічних умов. Результати свідчать, що збільшення напруги та тривалості впливу супроводжується підвищенням рН води, у той час як ОВП зменшується. При цьому зростання відстані між бар'єрним електродом і площиною рідини призводить до зменшення ефективності обробки, якщо напруга залишається незмінною. Це пояснюється зменшенням напруженості електричного поля. Таким чином, для компенсації збільшення міжелектродної відстані необхідне відповідне підвищення напруги, аби досягти аналогічних змін параметрів, як і при меншій відстані.

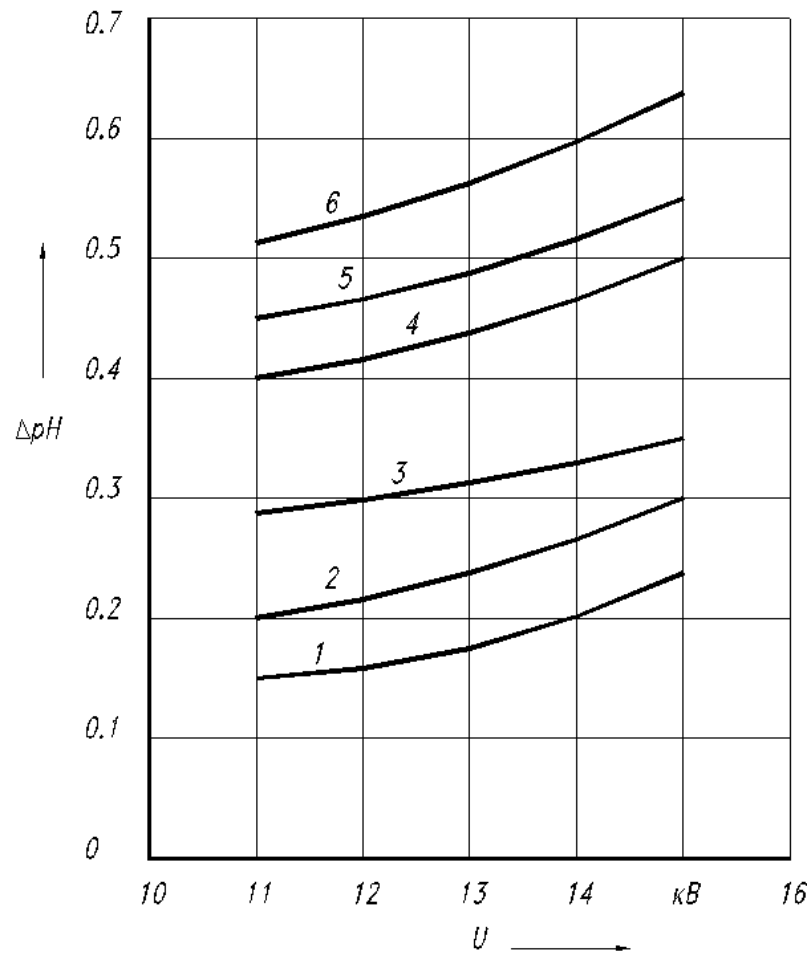


Рис. 3.1. Зміна рН поливної води (1,2,3) та магнітоактивованої води (4,5,6) при обробці в полі бар'єрного розряду тривалістю: 1,4 – 1 хв.; 2,5 – 2 хв.; 3,6 – 3 хв

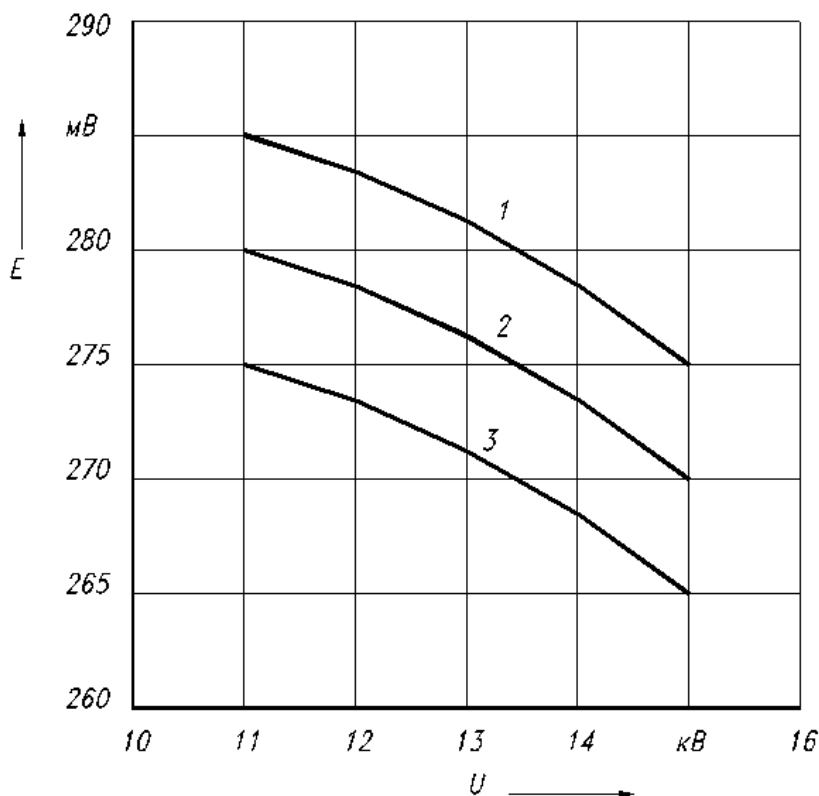


Рис. 3.2. Зміна ОВП води при обробці в полі бар'єрного розряду тривалістю:

1 – 1 хв.; 2 – 2 хв.; 3 – 3хв

Дослідження проводились як з електропровідним дном жолоба, у якому знаходилася вода, так і з неелектропровідним. Результати не показали суттєвої різниці у зміні рН та ОВП, що свідчить про домінуючу роль потоку аероіонів, які, слідуючи за силовими лініями електричного поля, проникають у водну фазу шляхом дифузії, спричиняючи зміни її електрохімічних властивостей.

Крім того, встановлено, що зміна товщини водяного шару не чинить істотного впливу на результати обробки. Це узгоджується з теоретичними моделями, згідно з якими ефективність впливу визначається переважно товщиною дифузійного шару, а не загальною глибиною розчину.

Обробка магнітоактивованої води в полі бар'єрного розряду виявилася більш ефективною, ніж застосування кожного з методів окремо. Установлено, що зміна водневого показника (рН) у такому випадку наближено дорівнює сумі

змін, які спостерігаються при магнітній та електричній обробках, проведених незалежно одна від одної.

Результати досліджень впливу електричної обробки на розчини солей та мінеральних добрив наведено на рис. 3.3 та 3.4. Як видно з графіків, характер зміни рН та окисно-відновного потенціалу (ОВП) для зазначених розчинів загалом відповідає аналогічним залежностям, отриманим для води, що оброблялася в аналогічному полі. Водночас в окремих випадках спостерігається послаблення ефекту впливу, зумовлене хімічним складом розчину. Максимальна зміна рН сягала 0,2–0,35 одиниці і була найбільш вираженою в розчинах з вищими початковими значеннями рН. Зміна ОВП становила 30–60 мВ, що підтверджує чутливість параметрів до іонного складу системи. Таким чином, ефективність обробки визначається концентрацією та іонним складом розчинів.

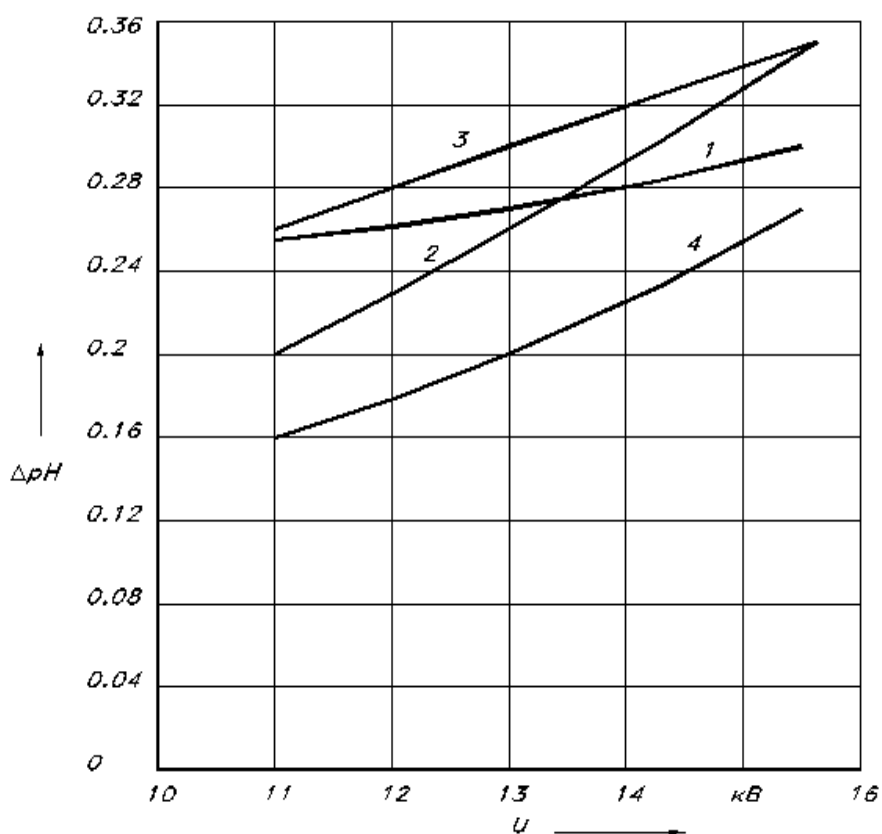


Рис. 3.3. – Зміна рН при обробці розчинів солей і мінеральних добрив (1 г/л) у полі бар'єрного розряду: 1 – калійної і кальцієвої селітри; 2 – сірчаноокислого калію; 3 – магнію сірчаноокислого семиводного; 4 – калію фосфорноокислого

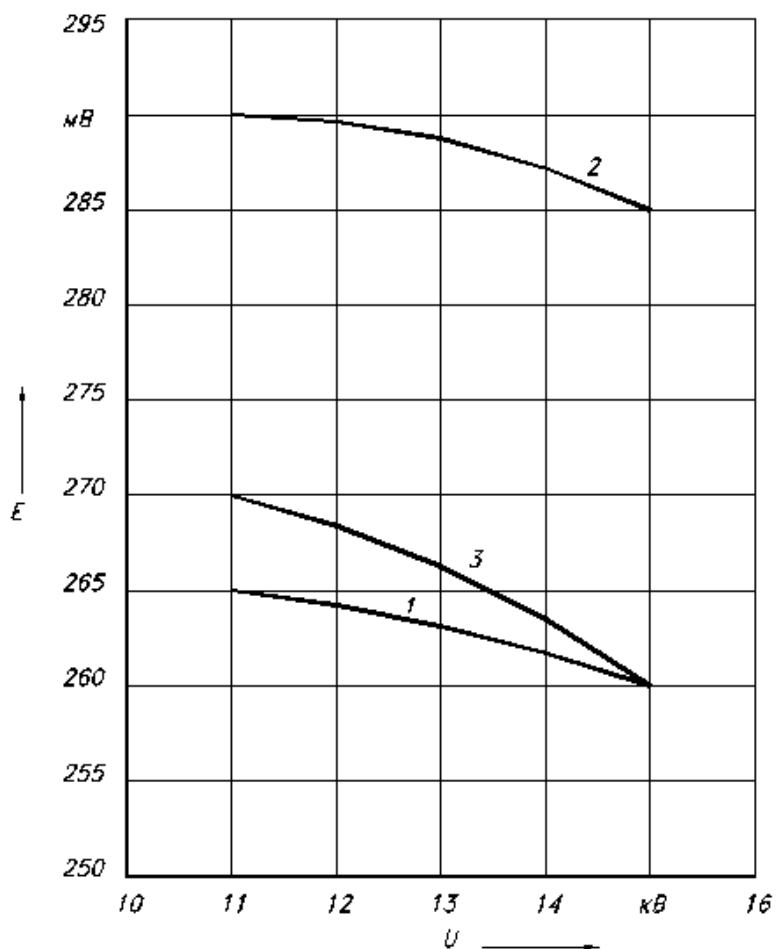


Рис. 3.4. Зміна ОВП розчинів солей і мінеральних добрив (1 г/л) при обробці в полі бар'єрного розряду: 1 – калійна селітра; 2 – кальцієва селітра; 3 – сірчаноокислі калій і магній

Отримані експериментальні дані щодо зміни рН та ОВП для води, а також для розчинів солей і добрив, дозволили підтвердити правильність теоретичних залежностей, запропонованих у попередніх розділах, і забезпечили можливість визначення відповідних коефіцієнтів шляхом використання методу найменших квадратів. Значення цих коефіцієнтів узагальнено у таблиці 3.1.

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що оптимальний режим електричної обробки водних розчинів у полі бар'єрного розряду досягається за таких умов: прикладена напруга — 15,5 кВ, відстань між бар'єрним електродом і поверхнею розчину — 3 см. Загальна міжелектродна відстань, відповідно до рекомендацій Г.М. Борща, повинна становити 5 см.

Оптимальна тривалість експозиції розчину у полі бар'єрного розряду — 1 хвилина, оскільки подальше збільшення часу впливу не призводить до суттєвого зростання ефективності обробки.

Додатково були проведені дослідження, спрямовані на вивчення динаміки збереження ефекту обробки поливної води в часі, результати яких наведено на рис. 3.5. Ці дані дозволяють оцінити стабільність змін рН і ОВП після впливу електричного поля, що має важливе значення для подальшого практичного застосування технології в аграрному та екологічному секторах.

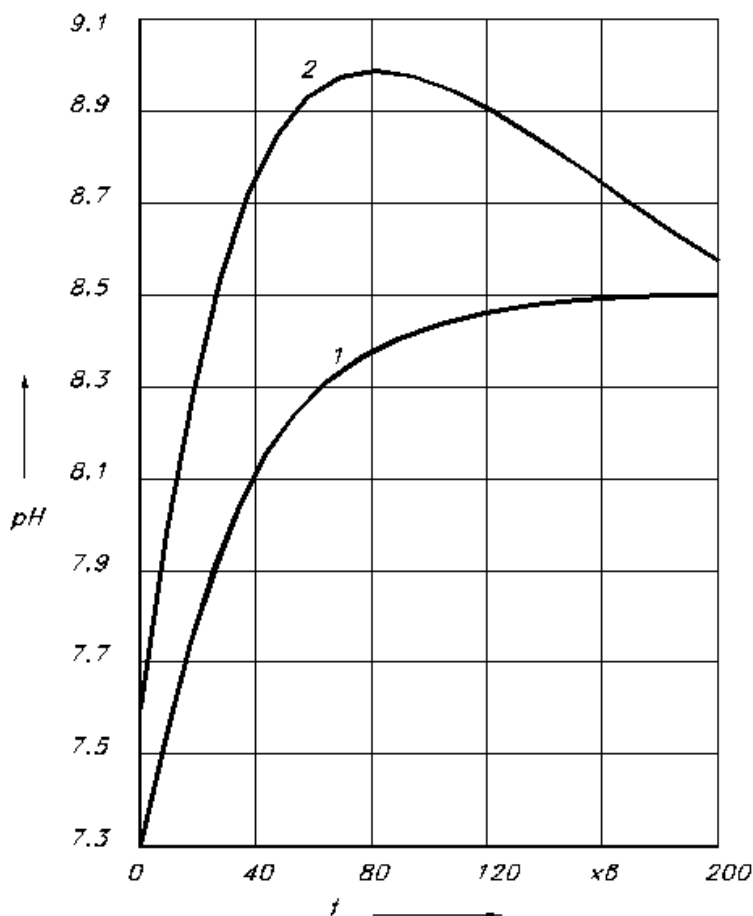


Рис. 3.5. Зміна рН в часі поливної води (1) і води, обробленої в полі бар'єрного розряду (2)

Як видно з наведеної залежності, показник рН води після обробки в полі бар'єрного розряду спочатку зростає, досягаючи максимального значення, після чого поступово знижується, наближаючись до рН необробленої води. Така

динаміка свідчить про наявність релаксаційних процесів у системі, які з часом призводять до відновлення попереднього стану.

При цьому характерно, що зростання рН у обробленій воді відбувається значно швидше, ніж у контрольному зразку, що вказує на активацію хімічних процесів унаслідок дії бар'єрного розряду. Таким чином, обробка води у високонапруженому електричному полі сприяє інтенсифікації хімічних реакцій, зокрема гідролізу та окисно-відновних перетворень у рідинній фазі.

Таблиця 3.1

**Значення коефіцієнтів в залежностях зміни рН та ОВП при обробці води і розчинів добрив в полі бар'єрного розряду**

Розчин	Концентрація, г/л	Коефіцієнти		Максимальна зміна рН	Максимальна зміна ОВП, мВ
		A, од.рН/кВ <sup>2</sup>	B,мВ/кВ <sup>2</sup>		
1. Вода		0,0011	0,089	0,35	55
2. Розчин кальцієвої селітри	1,0	0,00089	0,074	0,3	45
3. Розчин сірчаноокислого калію	1,0	0,0011	0,089	0,35	60
4. Розчин калійної селітри	1,0	0,00066	0,059	0,3	60
5. Розчин сірчаноокислого магнію	1,0	0,00089	0,089	0,35	60
6. Розчин фосфорноокислого калію	1,0	0,00059	0,037	0,21	38

### **3.3 Дослідження впливу обробки поливної води в полі бар'єрного розряду на ріст і розвиток рослин**

У результаті проведених досліджень встановлено, що електрична обробка поливної води в полі бар'єрного розряду чинить позитивний вплив на ріст і розвиток рослин. Зокрема, біометричні спостереження за динамікою росту огірків засвідчили достовірне прискорення розвитку вегетативної маси при використанні обробленої води. Результати біометричних вимірювань наведено в таблиці 3.2. Як показують дані, полив огірків водою, попередньо обробленою в полі бар'єрного розряду, призводив до прискореного росту рослин, причому статистично значуща різниця у висоті спостерігалася вже в період формування третього листка (30.06), а також у фазах початку цвітіння (8.07) та плодоношення (14.07). Перевищення у рості над контрольним зразком у ці дати становило відповідно 10,25 см, 15 см та 17 см. Найвищу ефективність виявлено при застосуванні комбінованої обробки — магнітоактивованої води, додатково обробленої в полі бар'єрного розряду. У цьому випадку приріст був ще більш вираженим: 14 см, 19 см та 22,5 см у відповідні періоди.

Крім того, зафіксовано, що використання електрично обробленої води сприяє ранішому настанню фаз цвітіння та плодоношення — на 2–3 доби швидше, порівняно з контрольними умовами.

Результати досліджень свідчать, що обробка поливної води в полі бар'єрного розряду сприяє збільшенню маси рослин (таблиця 3.3). Зокрема, на початку фази плодоношення середня маса рослин була на 9,1 г більшою, ніж у контрольній групі. Це перевищення є статистично достовірним, оскільки значення найменшої суттєвої різниці ( $НСР_{05}$ ) дорівнює 0,91 г. За умов використання магнітоактивованої води, яка додатково піддавалася впливу бар'єрного розряду, приріст маси склав 10,45 г, тоді як лише при магнітній обробці — 8,8 г. Це свідчить про синергетичний ефект комбінованої дії магнітного та електричного полів на фізіологічні процеси в рослинах.

Таблиця 3.2

## Результати біометричних вимірювань огірків

Варіант	Дата	Повторність				Середнє значення, см	Різниця $\Delta$ , см	F- критерій	Точність $\delta$ , %	НСР <sub>05</sub> , См
		1	2	3	4					
Контроль	16.06	13	17	16	16	15.5				
	23.06	22	29	28	29	27				
	30.06	59	63	58	60	60				
	8.07	79	88	82	91	85				
	14.07	119	132	119	130	125				
Вода, оброблена в полі бар'єрного розряду	16.06	15	16	17	18	16.5	1	6	2.5	1.4
	23.06	24	26	32	37	29.75	2.75	2.2	5.9	5.9
	30.06	60	72	73	76	70.25	10.25	11.7	3.1	7.2
	8.07	89	98	104	109	100	15	36.8	1.7	5.6
	14.07	133	149	141	145	142	17	120.9	0.8	3.6
Вода, оброблена в магнітному I полі бар'єрного розряду	16.06	16	17	18	19	17,5	2	6	2.5	1.4
	23.06	25	27	33	38	30.75	3,75	2.2	5.9	5.9
	30.06	63	75	78	80	74	14	11.7	3.1	7.2
	8.07	93	103	107	113	104	19	56.8	1.7	5.6
	14.07	138	156	146	150	147.5	22,5	120.9	0.8	3.6

Крім того, обробка поливної води у високонапруженому електричному полі позитивно впливає на урожайність овочевих культур, зокрема огірків. При застосуванні стандартної технології вирощування урожайність становила 26,8 кг/м<sup>2</sup> (таблиця 3.4). Застосування води, обробленої в полі бар'єрного розряду, дало приріст до 30,7 кг/м<sup>2</sup>, що відповідає зростанню на 14,7%. Найвищі результати отримані при використанні магнітоактивованої води, додатково обробленої в полі бар'єрного розряду — урожайність сягнула 32,05 кг/м<sup>2</sup>, що перевищує контрольний рівень на 21,2%.

Таблиця 3.3

## Маса рослин на початку періоду плодоношення

Варіант	Повторність				Середнє значення, Г	Різниця $\Delta$ , Г	F- критерій	Точність $\delta$ , %	НСР <sub>05</sub> , Г
	1	2	3	4					
Контроль	28.7	39	34.7	38.3	35.18				
Дослідний1	40.5	47.5	42.8	46.3	44.28	9.1	101.6	0.9	0.91
Дослідний2	42.3	49.0	43.7	47.5	45.63	10.45	101.6	0.9	0.91

Таблиця 3.4

**Урожайність огірків**

Варіант	Повторність				Середнє значення, кг/м <sup>2</sup>	Різниця Δ, кг/м <sup>2</sup>	F- критерій	Точність δ, %	НСР <sub>05</sub> , кг/м <sup>2</sup>
	1	2	3	4					
Контроль	26.3	28.2	26.3	26.4	26.8				
Дослідний1	30.0	32.5	30.1	30.3	30.7	3.9	101.6	0.9	0.91
Дослідний2	30.5	33.0	32.2	32.5	32.05	5.25	101.6	0.9	0.91

Отже, за результатами проведених досліджень встановлено, що обробка поливної води в полі бар'єрного розряду справляє суттєвий позитивний вплив на ріст і розвиток рослин. Зокрема, спостерігається прискорене формування вегетативної маси, раніше настання фаз цвітіння та плодоношення, збільшення біомаси та підвищення врожайності овочевих культур.

Найвища ефективність досягнута у разі застосування магнітоактивованої води, додатково обробленої в полі бар'єрного розряду, що свідчить про перспективність поєднання електрофізичних методів впливу на поливну воду з метою стимуляції фізіолого-біохімічних процесів у рослинах.

Результати польового дослідження також підтвердили вірність встановленого режиму обробки поливної води: напруга - 15,5 кВ, відстань між бар'єрним електродом і площиною 3 см, між електродами – 5 см, час обробки – 1 хв.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Комплексна система забезпечення безпеки праці під час експлуатації високовольтного обладнання ґрунтується на чинній нормативно-правовій базі, яка охоплює національні (ДСТУ) та міжнародні стандарти. Згідно з положеннями ДСТУ Б В.2.5-82:2016, проєктування будівель та споруд має передбачати реалізацію заходів із захисту від ураження електричним струмом, що включає надійне заземлення та якісну ізоляцію струмоведучих елементів.

На міжнародному рівні стандарт ІЕС 60364-1 встановлює базові вимоги до проєктування та монтажу електроустановок низької напруги з урахуванням безпеки користувачів і захисту майна. Додатково, технічний регламент Євразійського економічного союзу «Про безпеку високовольтного обладнання», що набуває чинності з 1 липня 2024 року, передбачає посилення вимог до процедур сертифікації та декларування відповідності за єдиними технічними умовами ЕАЕС.

На етапі проєктування та підготовки до випробувань важливо здійснювати комплексну оцінку ризиків. До основних джерел небезпеки належать: прямий контакт з частинами під напругою, імовірність пробоя повітряного проміжку з утворенням електричної дуги, а також поява провідних шляхів («мокрих містків») при обробці води у краплинному або плівковому режимі.

Для обмеження доступу до високовольтних відсіків доцільно застосовувати допускову систему з оформленням письмового дозволу на виконання робіт, що відповідає сучасним вимогам стандартів з оцінки ризиків у промисловості та енергетиці. Важливим елементом системи електробезпеки є попередній аналіз потенційних наслідків, зокрема, ідентифікація зон небезпечної напруги та визначення мінімально допустимих безпечних відстаней відповідно до ІЕС 61472-2:2021 із врахуванням положень щодо підвищення розрахункових відстаней для напруг до 350 кВ.

Організаційні заходи з охорони праці при роботі з високовольтним обладнанням передбачають чіткий розподіл відповідальностей, затвердження технологічних процедур і регулярне інструктування персоналу. Співробітники, залучені до підключення, налагодження та технічного обслуговування високовольтних установок, повинні мати групу з електробезпеки не нижче III та проходити початкові й повторні (кожні шість місяців) інструктажі, відповідно до вимог статей 1910.269 та 1910.147 стандартів OSHA (включно з процедурою lockout/tagout). Особливу увагу приділено реалізації системи lockout/tagout, яка передбачає надійне відключення, блокування джерел живлення та маркування місця робіт за допомогою сертифікованих пристроїв і ідентифікаційних бирок з вказанням відповідальної особи.

Технічні заходи захисту включають низку взаємопов'язаних компонентів. Основу становить система захисного заземлення та вирівнювання потенціалів металевих елементів, що забезпечує безпечний рівень напруги дотику за умов опору заземлення не більше 4 Ом. Ізоляційні бар'єри, кожухи розрядних пристроїв та металеві огороження захищають персонал від випадкового контакту з частинами, що перебувають під напругою, та витримують дію електричної дуги.

Критично важливо здійснювати періодичний контроль опору ізоляції кабельних систем, ізоляційних покриттів та ЗІЗ, таких як діелектричні рукавиці, відповідно до вимог стандартів ASTM D1050 і D1049.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) становлять останню бар'єрну лінію безпеки. Персонал має використовувати діелектричні рукавиці та калоші класу 00–2 згідно з NFPA 70E, а також захисні каски з внутрішнім кріпленням і лицьовими щитками з полікарбонату, які витримують термічне навантаження від електричної дуги. Додатково застосовується вогнестійкий захисний одяг, маркований ATPV  $\geq 1$  кал/см<sup>2</sup> відповідно до стандарту NFPA 2112, що мінімізує ризик опіків при впливі високотемпературних частинок.

У разі виникнення нештатної ситуації, пов'язаної з ураженням електричним струмом, необхідне чітке дотримання послідовності дій

відповідно до інструкцій з надання першої допомоги. Першим етапом є негайне відключення джерела живлення за допомогою дистанційних рубильників або аварійних вимикачів. Відповідно до вимог OSHA (Electric Shock First Aid), заборонено наближатися до потерпілого, доки подача напруги не припинена, після чого слід негайно викликати екстрені служби.

Далі необхідно оцінити стан постраждалого — перевірити прохідність дихальних шляхів, наявність пульсу, у разі потреби розпочати серцево-легеневу реанімацію (СЛР) та здійснити евакуацію на безпечну відстань з можливістю подальшого медичного обстеження.

Після усунення аварійної ситуації проводиться офіційний розбір інциденту, фіксуються обставини у журналі з охорони праці, здійснюється аналіз причин та коригування робочих процедур, що дозволяє попередити подібні події в майбутньому.

Узагальнюючи, ефективне забезпечення безпеки під час експлуатації імпульсних бар'єрних розрядів у водоочисних установках можливе лише за умови поєднання декількох критичних складових: дотримання нормативних вимог, всебічної оцінки ризиків, належної організації процесів, якісного технічного оснащення та системного підвищення кваліфікації персоналу. Взаємодія цих елементів формує інтегровану систему захисту, здатну мінімізувати ризики травмування та забезпечити стабільну й безпечну експлуатацію високовольтного обладнання.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВОДООЧИЩЕННЯ ТА ПЕРЕВАГИ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ

Глобальний дефіцит прісної води перетворився на одну з ключових екологічних загроз сучасності, що ставить під загрозу здоров'я мільйонів людей та стійкість екосистем. За даними ЮНЕСКО, станом на 2022 рік понад 2,2 млрд осіб не мали доступу до безпечних джерел питної води, а понад 703 млн — не отримували навіть базових послуг водопостачання. У міських регіонах лише чверть населення забезпечена водою, вільною від забруднень, що свідчить про суттєву нерівність між містом і селом у доступі до якісних водних ресурсів. Близько 73 % водойм у світі зазнають впливу хімічного забруднення, включно зі стійкими органічними сполуками (СОЗ), які надходять не лише з промислових скидів, але й внаслідок застосування агрохімікатів і лікарських засобів. Накопичення СОЗ у водному середовищі спричиняє біоаккумуляцію токсичних речовин, порушення гормонального балансу та канцерогенний ефект як для людей, так і для водної фауни. Кліматичні зміни додатково погіршують ситуацію, спричиняючи скорочення запасів прісної води та нерівномірність її географічного розподілу. Згідно з прогнозами ООН, до 2050 року до 5 мільярдів осіб можуть проживати в регіонах із хронічною нестачею води. Статистика ВООЗ засвідчує критичність проблеми: щорічно 3,4 млн смертей спричинено хворобами, пов'язаними з вживанням забрудненої води — серед них діарея, холера, гепатит А. Це, у свою чергу, призводить до зростання навантаження на системи охорони здоров'я та зниження економічної продуктивності через поширення інфекцій у зонах із низькою якістю води.

В умовах такої загрози зростає потреба у впровадженні комплексних водоочисних технологій, здатних ефективно нейтралізувати широкий спектр забруднювачів при мінімізації енерговитрат, викидів парникових газів і вторинного забруднення. Одним із перспективних напрямів є передові окисні

технології (Advanced Oxidation Technologies, AOT), що ґрунтуються на генерації високоактивних гідроксильних радикалів. Проте, ці технології часто характеризуються високими експлуатаційними витратами та складністю масштабування. У цьому контексті імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) вирізняється низкою переваг: він не потребує хімічних реагентів, здійснює генерацію активних радикалів безпосередньо в оброблюваній воді, знижує енергоспоживання й вуглецевий слід процесу.

Попри доведену ефективність у видаленні основних мікробіологічних і частини хімічних забруднювачів, традиційні методи очищення води супроводжуються суттєвими екологічними наслідками. Найпоширеніший спосіб дезінфекції — хлорування — призводить до утворення побічних сполук, таких як трихлорметани (ТТМ) і хлорооцтові кислоти (НАА5), що мають підтверджений канцерогенний вплив. Для регулювання їх вмісту в питній воді Агентство з охорони довкілля США (EPA) впровадило стандарти Stage 1 і Stage 2 DBPR, однак сезонні коливання температури й органічного навантаження часто призводять до перевищення нормативів і необхідності додаткової обробки.

Коагуляційно-флокуляційні методи, засновані на введенні реагентів (наприклад, сульфату алюмінію або полімерів), ефективні для видалення зважених часток, але породжують значні обсяги осаду. У США щорічно утворюється близько 4 млн тонн сухого осаду, з яких 2,4 млн тонн використовуються для удобрення, а понад 960 тис. тонн підлягають захороненню або спалюванню. Така утилізація супроводжується ризиками вторинного забруднення, оскільки осад може містити важкі метали, стійкі органічні сполуки.

Мембранні технології — ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос — демонструють високу ефективність очищення, проте вимагають значних енергетичних витрат ( $0,2\text{--}1,5$  кВт·год/м<sup>3</sup>) та створюють висококонцентровані відходи, які потребують подальшої обробки або безпечного захоронення.

Ультрафіолетова дезінфекція знижує утворення хімічних побічних продуктів, однак її ефективність різко зменшується за умов мутності понад 5 NTU або вмісту завислих речовин понад 10 мг/л, що зумовлює потребу в попередньому фільтруванні — із відповідними проблемами накопичення шламу чи фільтрату.

Хоча традиційні технології забезпечують базовий рівень мікробіологічної безпеки, вони супроводжуються низкою системних обмежень: утворення токсичних побічних продуктів, накопичення осадів, високе енергоспоживання та неефективність щодо сучасних забруднювачів. Ці чинники зумовлюють необхідність впровадження інноваційних технологічних підходів, які поєднуюватимуть високу ефективність очищення із екологічною та енергетичною стійкістю, відповідаючи принципам сталого розвитку.

Імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) характеризується високою локальною напруженістю електричного поля — до 30 кВ/см у зоні контакту з краплями або плівкою води, що сприяє інтенсивному утворенню високоактивних радикалів. Згідно з результатами пілотних випробувань в Італії, застосування ІБР для знешкодження нафтопродуктів у воді дозволило досягти їхньої концентрації нижче 0,1 мг/л при питомій енерговитраті 0,02 кВт·год/л.

Суттєвою екологічною перевагою цієї технології є відсутність потреби в хімічних реагентах і мінімальне утворення осаду, що значно спрощує експлуатацію та усуває необхідність утилізації шламів, характерних для традиційних методів очищення.

Таким чином, ІБР поєднує екологічну безпечність із високою енергоефективністю. Завдяки відмові від реагентів, низьким експлуатаційним витратам і конкурентному вуглецевому профілю, ця технологія має потенціал до широкого впровадження в системах сталого очищення води, особливо в умовах зростаючих екологічних вимог.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне теоретичне та експериментальне дослідження впливу імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) на властивості води в краплинно-плівковому стані з метою її очищення та активізації. Дослідження проводились у межах актуального науково-технічного завдання, що пов'язане з розробкою ефективних і екологічно безпечних технологій водоочищення в умовах зростання техногенного навантаження на водні ресурси.

На основі аналітичного огляду літератури встановлено, що традиційні методи очищення води, включаючи хлорування, не дозволяють ефективно видаляти стійкі органічні забруднювачі, зокрема бензолні та фармацевтичні сполуки. Зважаючи на це, розвинені окисні технології (АОТ's), які базуються на генерації високоактивних радикалів та озону безпосередньо у водному середовищі, стають все більш актуальними. Серед них особливий інтерес викликають електророзрядні методи, що не потребують реагентів, є енергоефективними та забезпечують глибоку мінералізацію забруднень. Імпульсний бар'єрний розряд має перевагу як за інтенсивністю створення активних форм кисню, так і за технічною простотою реалізації.

Фізичне моделювання процесів ІБР у водно-повітряному середовищі дозволило виявити особливості розподілу електричного поля при краплинно-плівковій структурі води. Показано, що така структура сприяє локальному зростанню напруженості поля до 30 кВ/см, що створює умови для ефективної генерації активних частинок у зоні дії розряду. Цей ефект обумовлений геометрією рідини в об'ємі та наявністю неоднорідностей, які посилюють локальне електричне поле.

У ході експериментальних досліджень було виявлено зміну ряду фізико-хімічних характеристик води після обробки ІБР. Зокрема, зафіксовано незначне зменшення або збільшення значень рН залежно від типу розчину (наприклад,  $\Delta\text{pH}$  становило близько 0,0011), а також зростання окисно-відновного потенціалу до +89 мВ. Виявлено емпіричну залежність між

інтенсивністю розряду та змінами характеристик води, що описується коефіцієнтами А і В. Це свідчить про ефективне збагачення води активними формами кисню та її окисну активацію.

Особливу увагу було приділено біологічним наслідкам використання обробленої ІБР води у сільському господарстві. Дослідження впливу такої води на ріст рослин (огірків) показали суттєві переваги: висота рослин зросла на 10,25–17 см у порівнянні з контролем, а при комбінованій обробці (ІБР + магнітне поле) — до 22,5 см. Маса рослин збільшилась на 9,1–10,45 г, а урожайність зросла до 32,05 кг/м<sup>2</sup>, що становить приріст на 14,7 % у випадку ІБР та до 21,2 % за комбінованого впливу. Також зафіксовано пришвидшення фаз цвітіння та плодоношення на 2–3 доби. Таким чином, підтверджено позитивний вплив активованої води на життєдіяльність рослин.

У розділі з охорони праці проаналізовано потенційні небезпеки, пов'язані з експлуатацією високовольтного обладнання. Запропоновано технічні та організаційні заходи безпеки, серед яких застосування захисного заземлення, екранів, блокувань і обов'язкове навчання персоналу, що дозволяє мінімізувати ризики у роботі з установкою ІБР.

Екологічна оцінка методу ІБР показала його перевагу перед традиційними технологіями завдяки відсутності вторинного забруднення та можливості роботи без хімічних реагентів. Питоме енергоспоживання установки складає лише 0,02 кВт·год/л, що робить її привабливою з позиції сталого розвитку та енергоощадності. Такий підхід може бути інтегрований у сучасні системи водопідготовки та використаний як у централізованому, так і в локальному масштабі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Talabi A.O., Kayode T.J. Groundwater pollution and remediation. *Journal of Water Resource and Protection*. 2019. T. 11, № 1. С. 1–19.
2. Vanraes P., Nikiforov A., Leys C. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. *Plasma science and technology*. 2016. Chapter 15. Pp.
3. Miklos D.B., Remy C., Jekel M., Linden K.G., Drewes J.E., Hübner U. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. A critical review. *Water Research*. 2018. Vol. 139. Pp. 118-131.
4. Song, K., Mohseni, M., Taghipour, F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review. *Water Research*. 2016. Vol. 94. Pp. 341-349.
5. Chen, J., Loeb, S., Kim, J.-H., 2017. LED revolution: fundamentals and prospects for UV disinfection applications. *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2017. Vol. 3. Pp. 188-202.
6. Берека В. О. Електрофізичні процеси при обробці води в краплинно-плівковому стані імпульсним бар'єрним розрядом : дис. ... д-ра філософії : 141 – *Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Інститут електродинаміки НАН України*. – Київ, 2023. – 132 с.
7. Liu Z.-h., et al. Removal mechanisms for endocrine disrupting compounds (EDCs) in wastewater treatment—physical means, biodegradation, and chemical advanced oxidation: a review. *Science of the Total Environment*. 2009. Vol. 407. Pp. 731–748.
8. Luo Y., et al. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 473–474. Pp. 619–641.
9. 13. Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–368.

10. Hoeben W.F.L.M., van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Cramers C.A.M.G., Kroesen G.M.W. The degradation of aqueous phenol solutions by pulsed positive corona discharges. *Plasma Sour. Sci. Technol.* 2000. No 9. Pp. 361–369.

11. Божко І.В., Кондратенко І.П. Ефективність обробки водного розчину метиленової сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню. *Технічна електродинаміка*. 2018. No 6. С. 89-97.

12. Sugai T., Liu W., Tokuchi A., Jiang W. and Minamitani Y. Influence of a circuit parameter for plasma water treatment by an inductive energy storage circuit using semiconductor opening switch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013. Vol. 41. No 4. Pp. 967-974.

13. T. Sugai, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani. Investigation for optimization of an inductive energy storage circuit for electrical discharge water treatment. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2014. Vol. 42. No 10. Pp. 3101-3108.

14. Sugai T., Jiang W., Tokuchi A. Influence of Forward Pumping Current on Current Interruption by Semiconductor Opening Switch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015. Vol. 22. No 4. Pp. 1971-1975.

15. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Фізична хімія бар'єрного розряду. – Дюссельдорф: DVS-Verlag, 1997. 176 с.

16. Yoshida K., Tagashira H. Papers of technical meeting on electrical discharges. *Institute Electr. Eng. Japan*, 1987. P. 29-38.

17. Kornev I., Isaev Yu. N., Ushakov V. Ya., Khaskelberg M. B., Yavorovskii N. A., Kolchanova V. A. Influence of the distribution of electric fields in a reactor of electrodischarge water treatment on the treatment efficiency. *Russian Physics Journal*. Vol. 47. No. 10. 2004. Pp. 1062-1070.

18. Biljana P. Dojchinovich, Goran M. Roglicb, Bratislav M. Obradovich,, Milorad M. Kuraicaca ,Mirjana M. Kostich, Jelena Nesich, Dragan D. Manojlovich. Decolorization of reactive textile dyes using water falling film dielectric barrier discharge. *Journal of Hazardous Materials*. 2011. №192. Pp. 763 – 771.

19. Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Чарний Д.В. Розробка комплексу для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2017. №6. С. 80–86.
20. Kornev I.A., Yavorovsky N.A., Preis S.V., Khaskelberg M.B., Isaev U.S., Chen B.-N. Generation of active oxidant species by pulsed dielectric barrier discharge in water-air mixtures. *Ozone: Science & Engineering*. 2006. Т. 28, № 4. С. 207.
21. Борцов А.В., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Физическое моделирование проникновения «срезанных» импульсов магнитного поля в цилиндрическую проводящую оболочку. *Технічна електродинаміка*. 2008. №5. С. 90-95.
22. Knappert J., McHardy C., Rauh C. Kinetic modeling and numerical simulation as tools to scale microalgae cell membrane permeabilization by pulsed electric fields. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Т. 8. Арт. 209.
23. Golubovskii Yu. B., Maiorov V. A., Behnke J. F., Tepper J., Lindmayer M. Study of the homogeneous glow-like discharge in nitrogen at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2004. Vol.37. Pp.1346–1356.
24. Yukinori Sakiyama, David B. Graves, Hung-Wen Chang, Tetsuji Shimizu, Gregor E., Morfill J. Plasma chemistry model of surface microdischarge in humid air and dynamics of reactive neutral species. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45. P. 425201 (19pp).
25. Shuai Zhang, Li Jia, Wen-chun Wang, De-zheng Yang, Kai Tang, Zhi-jie Liu. The influencing factors of nanosecond pulse homogeneous dielectric barrier discharge in air. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. Vol.117. Pp. 535–540.
26. Bozhko I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue 12. Pp. 3064 – 3069.

27. Закон України «Про ринок електричної енергії». В редакції від 29 грудня 2019 року, підстава №394-ІХ. Відомості Верховної Ради, 2017, № 27-28, ст.312.

28. Закон України «Про енергозбереження». ( Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2006, №15, ст.126).

29. ДБН А.2.2. -1 - 2003 Проектування. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище(ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд.

30. ДБН А.2.2. -3 - 2012 Склад та зміст проектної документації.

31. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Харків: Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.

32. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012) Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 2 березня 2012 р. за № 350/20663.

## ДОДАТКИ

## Додаток А

Таблиця А.1

## Зміна рН при обробці водних розчинів у полі бар'єрного розряду

Дослід	U, кВ	h, см	t, хв.	Вода	Магніто- активована вода	Розчини, 1г/л				
						KNO <sub>3</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
рН розчину				7,3	7,6	7,3	7,3	7,35	7,3	6,8
1	11	3	1	0,15	0,4	0,1	0,13	0,15	0,15	0,03
2	13	3	1	0,18	0,44	0,12	0,16	0,17	0,19	0,05
3	15,5	3	1	0,23	0,5	0,15	0,21	0,21	0,25	0,08
4	11	3	2	0,2	0,45	0,12	0,2	0,18	0,18	0,08
5	13	3	2	0,24	0,49	0,15	0,23	0,22	0,22	0,1
6	15,5	3	2	0,3	0,55	0,2	0,28	0,28	0,28	0,13
7	11	3	3	0,29	0,51	0,25	0,25	0,21	0,25	0,12
8	13	3	3	0,31	0,56	0,27	0,27	0,26	0,29	0,16
9	15,5	3	3	0,35	0,63	0,3	0,3	0,35	0,35	0,2
Gr				0,267	0,267	0,267	0,148	0,267	0,111	0,267

Таблиця А.2

## Зміна ОВП, мВ при обробці водних розчинів у полі бар'єрного розряду

Дослід	U, кВ	h, см	t, хв.	Вода	Магніто- активована вода	Розчини, 1г/л				
						KNO <sub>3</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
ОВП розчину				320	305	320	330	320	320	240
1	11	3	1	35	40	40	20	27	26	25
2	13	3	1	39	44	44	24	32	32	27
3	15,5	3	1	45	50	50	30	40	40	30
4	11	3	2	40	45	50	30	40	40	27
5	13	3	2	44	49	52	34	44	44	29
6	15,5	3	2	50	55	55	40	50	50	32
7	11	3	3	45	50	55	40	50	50	31
8	13	3	3	49	54	57	42	54	54	34
9	15,5	3	3	55	60	60	45	60	60	38
Gr				0,477	0,222	0,267	0,167	0,167	0,19	0,267

