

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**
УДК 621.3:658.567.5:633.1

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій

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

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

„_____” _____ 2025 р.
число місяць рік

„_____” _____ 2025 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО
КОМПЛЕКСУ ЗНЕЗАРАЖУЮЧОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНОВИХ»**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

_____ д.т.н., професор _____
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Кривонос В.Є.

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

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

_____ (підпис)

Усенко С.М.

(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Бабенко М.А.

(ПІБ)

КИЇВ – 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій
к.т.н., доцент _____ /ОКУШКО О.В./
(підпис)
« _____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

Бабенко Михайло Андрійович

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Розробка та дослідження електротехнологічного комплексу знезаражуючої обробки зернових»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024 № 1665”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15. 05 . 2025

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Технічна документація.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз існуючих електрофізичних методів передпосівної обробки зернових;
2. Теоретичні передумови знезаражуючої обробки зерна в електричному полі високої напруженості змінного струму;
3. Експериментальні дослідження електрофізичних процесів в зерновій масі під впливом електричного поля високої напруженості;
4. Розробка та автоматизація технологічного процесу обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості з використанням scada-системи;
5. Техніко-економічні показники.

Дата видачі завдання 26.09.2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Усенко С.М.**
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____ **Бабенко М.А.**
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 101с., 34 рис., 5 табл., 45 джерела.

Об'єкт дослідження – процес знезараження зерна під впливом електричного поля високої напруженості.

Мета роботи – наукове обґрунтування та розробка енергозберігаючих електротехнологій і відповідного технологічного обладнання для знезараження зерна, що сприятиме підвищенню якості продукції, зниженню втрат при зберіганні та покращенню її екологічних характеристик.

Методи дослідження та апаратура – використано методи математичного моделювання, статистичної обробки даних, теорії планування експериментів; застосовано вимірювальні прилади: кіловольтметр, мікроамперметри, вольтметри.

Технологія обробки зерна сильними електричними полями дає змогу скоротити застосування хімічних засобів захисту та підвищити збереженість продукції на 10–15%. Ефективність знезараження зумовлена утворенням озону в результаті іонізаційних процесів у зерновій масі, що забезпечує потужний бактерицидний ефект.

Проведено теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження щодо впливу параметрів електричного поля на розвиток іонізаційних процесів і концентрацію озону. Встановлено залежність питомої електропровідності зерна та озонування від величини напруженості поля.

Для підвищення точності контролю та автоматизації процесу впроваджено SCADA-систему, яка забезпечує візуалізацію параметрів технології, зокрема контроль напруги, струму, температури та вологості зернової маси в реальному часі. Система дозволяє оперативно регулювати технологічні режими, зберігати історію даних та підвищити стабільність процесу обробки.

ЗНЕЗАРАЖЕННЯ, ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ, ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ, SCADA-СИСТЕМА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ОЗОНОУТВОРЕННЯ, ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ.

ABSTRACT

Master's thesis: 101 p., 34 figures, 5 tables, 45 sources.

The object of research is the process of grain disinfection under the influence of a high intensity electric field.

Purpose - scientific substantiation and development of energy-saving electrical technologies and appropriate technological equipment for grain disinfection, which will improve product quality, reduce storage losses and improve its environmental characteristics.

Research methods and equipment - methods of mathematical modeling, statistical data processing, theory of experiment planning were used; measuring instruments: kilovoltmeter, microammeter, voltmeter were used.

The technology of grain treatment with strong electric fields makes it possible to reduce the use of chemical protection agents and increase product safety by 10-15%. The efficiency of disinfection is due to the formation of ozone as a result of ionization processes in the grain mass, which provides a powerful bactericidal effect.

Theoretical calculations and experimental studies on the influence of electric field parameters on the development of ionization processes and ozone concentration were carried out. The dependence of the specific electrical conductivity of grain and ozone formation on the field intensity was established.

To improve the accuracy of control and automation of the process, a SCADA system was implemented, which provides visualization of process parameters, including real-time monitoring of voltage, current, temperature and moisture content of the grain mass. The system allows to quickly regulate technological modes, store data history and increase the stability of the processing process.

DISINFECTION, HIGH-VOLTAGE ELECTRIC FIELD, ELECTRICAL TECHNOLOGY, SCADA-SYSTEM, AUTOMATION, OZONE FORMATION, ELECTRICAL CONDUCTIVITY.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. Аналіз існуючих електрофізичних методів передпосівної обробки зернових	9
1.1. Аналіз сучасного стану технологій знезараження зерна	9
1.2. Електрофізичні методи знезараження зерна	16
1.3. Аналіз впливу вологості зерна на його електрофізичні властивості і результати обробки	18
1.4. Огляд електротехнологічних засобів з обробки зерна при зберіганні	20
1.5. Сучасні методи отримання озону	25
1.6. Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2. Теоретичні передумови знезаражуючої обробки зерна в електричному полі високої напруженості змінного струму	29
2.1. Теоретичні дослідження електричних розрядів в повітрі	29
2.2. Розрахунок повного струму, що проходить через зернову масу під впливом змінного електричного поля високої напруженості	33
2.3. Теоретичні дослідження синтезу озону та оксидів азоту в зерновій масі під дією розрядів та їх вплив на мікроорганізми	44
2.4. Висновки до розділу 2	47
РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження електрофізичних процесів в зерновій масі під впливом електричного поля високої напруженості	49
3.1. Дослідження електрофізичних процесів в зерновій масі	49
3.2. Дослідження концентрації озону в зерновій масі при різних режимах обробки	54

	6
3.3. Дослідження впливу знезаражуючої обробки на життєдіяльність мікрофлори зерна та його посівні якості	58
3.4. Висновки до розділу 3	61
РОЗДІЛ 4. Розробка та автоматизація технологічного процесу обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості з використанням scada-системи	63
4.1. Розробка способу та технологічного процесу знезаражуючої обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості при зберіганні	63
4.2. Розробка та дослідження експериментальної установки	68
4.3. Розробка та дослідження експериментальної установки з інтеграцією SCADA-системи	77
4.4. Реалізація SCADA-системи для знезараження зернових	80
4.5. Висновки до розділу 4	82
РОЗДІЛ 5. Техніко – економічні показники	84
5.1. Дослідження впливу знезаражуючої обробки на життєдіяльність мікрофлори зерна та його посівні якості	84
5.2. Техніко – економічні показники роботи установки при обробці зернової маси	91
5.3. Висновки до розділу 5	93
ВИСНОВКИ	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97

ВСТУП

Збільшення валового збору зернових та підвищення їх конкурентоспроможності на світовому ринку є одним із ключових напрямів економічного та соціального розвитку України. Досягнення цього можливо за рахунок підвищення врожайності, покращення якості зерна та мінімізації втрат під час зберігання.

Однією з головних проблем, що негативно впливають на якість зерна, є активність мікроорганізмів, зокрема грибів. Близько 85% збудників небезпечних хвороб злакових культур — це гриби, з яких 80% мають токсичні властивості. Грибкове ураження не лише знижує товарну цінність зерна, але й робить його непридатним для використання, якщо концентрація токсинів перевищує 5 мг/кг. За час зберігання (3–6 місяців) поверхнєве зараження зерна грибами може зрости у 35–40 разів, внутрішнє — у 3–4 рази, що спричиняє втрату 2–3 млн тонн зерна щорічно.

Існуючі хімічні методи боротьби з мікрофлорою мають ряд недоліків: низьку ефективність проти окремих захворювань, забруднення довкілля та продуктів рослинництва, а також непридатність для обробки продовольчих партій зерна.

У світлі сучасних вимог до екологічно безпечних технологій дедалі більшого значення набувають фізичні методи обробки. Серед них — термічне знезараження, використання рентгенівського та гамма-випромінювання, а також надвисокочастотні поля. Проте висока енергоємність і обмеженість застосування стримують їх широке впровадження.

Перспективним методом є озонування зерна, яке добре вивчене з санітарно-гігієнічної точки зору. Однак існуючі технології озонування мають низький коефіцієнт корисної дії через частковий розклад озону під час транспортування та нерівномірний його розподіл у зерновій масі. Це значно знижує ефективність обробки.

Альтернативним напрямом є використання електричного поля високої напруженості, де внаслідок часткових розрядів іонізаційні процеси сприяють генерації озону безпосередньо в об'ємі зерна. Раніше дослідження фокусувалися на постійному струмі, тоді як використання змінного струму, що забезпечує вищу концентрацію озону, залишається недостатньо вивченим.

Таким чином, актуальним є обґрунтування режимів знезараження зерна, що базуються на впливі електричного поля високої напруженості змінного струму. Це дозволить створити енергоефективний електротехнологічний комплекс, здатний підвищити якість зерна та забезпечити ефективне зберігання.

У контексті автоматизації технологічних процесів все більшого значення набуває впровадження SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition). Розробка SCADA для системи знезараження зерна дозволяє реалізувати моніторинг і керування ключовими параметрами процесу в реальному часі. Це забезпечує точність дозування електричної енергії, контроль напруженості електричного поля, моніторинг концентрації озону, температури та вологості. Завдяки використанню SCADA знижується ризик відхилень від заданого режиму, зменшується вплив людського фактора, підвищується надійність і безпека експлуатації, а також створюються умови для накопичення статистичних даних і подальшої оптимізації процесу. Впровадження SCADA-технологій є важливою складовою цифровізації аграрного сектору, що відповідає сучасним вимогам сталого та ресурсоефективного розвитку.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНОВИХ

1.1. Аналіз сучасного стану технологій знезараження зерна

Проблема забезпечення населення якісними продуктами харчування є одним із ключових викликів сучасності. Її вирішення залежить не лише від збільшення обсягів виробництва зернових культур, але й від забезпечення їхнього збереження з мінімальними втратами. Втрата врожаю через хвороби, шкідників, а також через неефективне використання потенціалу насінневого матеріалу значно знижує якість і кількість зібраного зерна.

За даними Держкомстату України, щорічно близько 1,2 млн тонн зерна, або 5% від загального врожаю, втрачається через несприятливі умови зберігання. Подібні цифри наводить і ФАО (Продовольча та сільськогосподарська організація ООН), яка акцентує на глобальних втратах зернових культур.

Зберігання зерна у сприятливих умовах дозволяє насінню тривалий час зберігати життєздатність. Історичні знахідки демонструють, що насіння, знайдене під час археологічних розкопок, зберігало схожість навіть через сотні або тисячі років. Наприклад, у Канаді виявлено насіння віком приблизно 15 тисяч років, що мало задовільну життєздатність. Подібні знахідки насіння віком від 200 до 1700 років також підтверджують його схожість.

Основною причиною втрати якості зерна є активна життєдіяльність мікроорганізмів, зокрема бактерій та пліснявих грибів, які накопичуються на оболонках зерна разом із пилом. У сприятливих умовах ці мікроорганізми швидко розмножуються, що негативно впливає на якість зернової маси. Це вимагає впровадження ефективних технологій знезараження у процесах переробки та зберігання зерна.

Вплив мікроорганізмів на зернову масу проявляється у втраті свіжості, зміні кольору, запаху та смаку зерна, погіршенні його технологічних якостей, зниженні посівних властивостей і товарної цінності через пошкодження зародків. Також мікроорганізми сприяють накопиченню токсинів і надмірного тепла у зерновій масі, що призводить до значних втрат і погіршення якості врожаю.

Дослідження підтверджують, що під час збирання врожаю чисельність мікрофлори зерна значно зростає. Зокрема, на поверхні зерна виявлено від 40 до 800 тисяч бактерій, що свідчить про високу мікробну контамінацію під час збирання та обробки зерна [1].

Крім того, епіфітна мікофлора зерна представлена сапрофітними та слабко паразитними грибами, які живляться органічними речовинами відмерлих органів рослин. Колонізація зерна грибами посилюється при пошкодженні рослин шкідниками чи іншими чинниками, передчасному всиханні або виляганні рослин [2].

Відомо також, що мікрофлора зернової маси включає плісняві гриби, які утворюють спори. Ці гриби є другою за чисельністю групою мікроорганізмів у зерновій масі (1–2% від загальної кількості мікроорганізмів). Вони невибагливі до умов середовища і здатні розмножуватися у широкому діапазоні вологості та температури, що призводить до втрати маси зерна, погіршення його якості або повного псування [1].

Таким чином, під час збирання врожаю відбувається значне збільшення чисельності мікрофлори зерна, що негативно впливає на його якість та зберігання. Це підтверджується дослідженнями українських науковців, які вивчали мікробіологічні процеси під час зберігання зерна [3].

У зерновій масі різних культур виявляється до 60 різновидів пліснявих грибів. Їхній розвиток під час зберігання є однією з ключових причин зниження харчової та посівної якості зерна. Дослідження свідчать, що певні види пліснявих грибів здатні продукувати токсичні речовини, які є результатом їхньої життєдіяльності. Якщо концентрація цих токсинів перевищує 5 мг на 1 кг зерна,

таку продукцію заборонено використовувати як корм для тварин. Виявлено зв'язок між кормами, інфікованими окремими видами грибів *Penicillium*, та захворюваннями свиней.

Також підтверджено, що погіршення якості зерна через зараження пліснявими грибами супроводжується стрімким руйнуванням полярних ліпідів (гліколіпідів і фосфоліпідів), які є важливими компонентами для випікання хліба. Хліб, виготовлений із пошкодженого борошна, характеризується меншим об'ємом і гіршою пористістю порівняно з хлібом, випеченим із якісного борошна.

Під час збирання врожаю зерно може зазнавати зараження твердою сажкою, оскільки сажкові мішечки руйнуються під час обмолоту. Як зазначає Є. Є. Гешеле, існує чітка залежність між концентрацією спор у насінні та рівнем ураженості рослин. Так, при зараженні насіння пшениці сорту «Білозерна» твердою сажкою у межах від 0,1 до 3 г ураженість рослин у полі зростала з 25 % до 64 %. Для сорту пшениці «Українка», чутливого до сажки, при заспоренні від 100 до 60 000 спор на одну зернину зараженість колосся збільшувалася з 0,7 % до 98 %.

Очищення зерна від грибів і бактерій є одним із ключових завдань для підвищення якості продовольчих і кормових партій, а також для покращення посівних та врожайних характеристик насінневого матеріалу.

На сьогодні для знезараження використовуються біологічні, хімічні та фізико-механічні методи (рис. 1.1), проте хімічні способи досі домінують.



Рис. 1.1. Класифікація існуючих способів знезаражуючої обробки зернових

Біологічний спосіб боротьби. Біологічні методи боротьби зі шкідниками сільськогосподарських культур активно розвиваються в кількох напрямках: вивчення природних хижаків і паразитів шкідників, можливості їх акліматизації, масового розведення та використання; дослідження раціональних поєднань пестицидів з біологічними препаратами; розробка засобів і способів пригнічення спадковості шкідників.

Однак, щодо шкідників зернових запасів, біологічні методи застосовуються менш інтенсивно через специфіку об'єкта.

Введення в зерно та зернові продукти хижаків і паразитів або стерильних самців практично непридатне, оскільки це може засмічувати продукт і погіршувати його якість.

Натомість, біологічні методи ефективно використовуються в захисті польових культур. Наприклад, трихограма — природний паразит багатьох шкідливих лускокрилих — розводиться у великих кількостях та застосовується для контролю їх чисельності [4, 5].

Загалом, біологічний метод, як система захисту рослин, тобто контроль шкідників за допомогою їх природних ворогів-ентомофагів (комах, а згодом і

кліщів, нематод, вірусів, грибів, найпростіших), успішно застосовується вже близько 120-ти років [6].

Проте, у випадку шкідників зернових запасів, біологічні методи мають обмежене застосування через складність інтеграції природних ворогів у системи зберігання зерна без ризику погіршення його якості.

Хімічний спосіб боротьби є найбільш використовуваним і базується на застосуванні різноманітних хімічних засобів. До препаратів, що використовуються для знезараження зернових, висуваються певні вимоги. Вони повинні мати високу токсичність, бути стійкими до змін зовнішніх умов середовища, таких як температура, світло, вологість тощо. Ці препарати не повинні впливати на харчові, хлібопекарські, біохімічні, насінневі та інші характеристики зерна і продуктів його обробки, не передавати їм неприємного запаху і не залишати шкідливих залишків після обробки. Вони повинні бути малотоксичними або нетоксичними для людини, не мати вибухових чи вогнебезпечних властивостей, а також бути дешевими та доступними. Проте, на сьогоднішній день жоден з використовуваних хімічних засобів не відповідає всім зазначеним вимогам.

Хімічні методи боротьби зі шкідниками зерна, такі як фумігація, широко застосовуються для захисту зернових запасів. Фумігація є одним із найефективніших хімічних заходів, що забезпечує практично повне знищення шкідливих організмів. Однак цей метод має певні недоліки, зокрема високу вартість, використання речовин високого класу токсичності та складну підготовку.

Нещодавно набув поширення метод тимчасової консервації зерна через обробку низькомолекулярними кислотами. Однак проблема хімічної консервації зерна досі не вирішена, оскільки бракує даних щодо їх впливу на технологічні, біохімічні та харчові властивості зерна. Крім того, цей метод підходить лише для обробки фуражного зерна, що обмежує його широке використання.

Обробка зерна хімічними препаратами супроводжується значними витратами на їх виробництво, зберігання та транспортування. Використання

хімічних засобів порушує біологічну рівновагу в природі, становить небезпеку для здоров'я людей і може навіть пригнічувати розвиток насінин після інкрустації та недостатньої вологості. Полімерна плівка, що покриває насінину, може затримувати процеси росту. Методи знезараження зерна, що широко використовуються в сільському господарстві, окрім прямої дії, мають побічні ефекти, які зрештою впливають як на здоров'я людини, так і на навколишнє середовище.

Фізичні методи знезараження зерна є важливим елементом інтегрованого захисту запасів, дозволяючи знижувати чисельність шкідників без використання хімічних речовин, що є важливим для безпеки харчової продукції та навколишнього середовища. До цієї групи методів належать сепарація, охолодження та нагрівання зерна.

Механічне очищення зерна ефективно лише в холодну погоду, коли одночасно з сепарацією зерно охолоджується. Використання низьких „летальних” температур знаходить застосування в основному в районах із сприятливим для цього кліматом.

Сепарація – це процес відокремлення зерна від домішок (бур'янів, битого зерна, пилу, комах та їх личинок) за допомогою спеціальних машин – сепараторів. Очищення зерна від домішок створює несприятливі умови для розвитку шкідників та мікроорганізмів, а також підвищує ефективність інших методів знезараження. Очищення та вентиляція є важливими складовими належного зберігання зерна та запобігання розвитку шкідників. Сепарація ефективна не тільки для видалення шкідників, але й для покращення якості зерна, його аерації та підготовки до подальшої обробки.

Охолодження зерна до низьких температур (нижче $+10^{\circ}\text{C}$, а для деяких шкідників – нижче $+5^{\circ}\text{C}$) призводить до припинення розвитку та розмноження комах. Природне охолодження взимку є ефективним методом. Також існують методи штучного охолодження за допомогою вентиляції холодним повітрям або спеціальних холодильних установок. В стандартах з термічної та холодової обробки описуються режими охолодження для знищення шкідників. Важливим

є досягнення та підтримання необхідної температури протягом певного часу. Охолодження є екологічно чистим методом, але його ефективність залежить від кліматичних умов та наявності відповідного обладнання.

Нагрівання зерна до високих температур є ефективним методом знищення шкідників на всіх стадіях розвитку. Температура понад $+50^{\circ}\text{C}$ протягом певного часу є летальною для більшості шкідників. Проте, важливо контролювати температуру, щоб не погіршити якість зерна (особливо посівного). Існують різні методи нагрівання, такі як сушіння, обробка інфрачервоним випромінюванням та високочастотним струмом. Досліджується вплив різних температур на життєздатність різних видів шкідників та ефективність різних методів нагрівання, таких як мікрохвильове випромінювання та радіочастотне нагрівання. Для досягнення 100% загибелі всіх шкідників у всіх стадіях розвитку необхідна температура зерна порядку $+65-70^{\circ}\text{C}$. Однак, нагрівання до такої температури може призвести до зниження агрономічних якостей зерна, особливо посівного. Тому, необхідно застосовувати такі методи нагріву, які б мінімізували негативний вплив на якість зерна, наприклад, методи нагріву за допомогою інфрачервоних променів та енергії високої та надвисокої частот.

Фізичні методи знезараження зерна є важливими інструментами в інтегрованій системі захисту запасів. Їх ефективність залежить від правильного вибору методу та дотримання технологічних режимів. Найбільш ефективним є комбіноване використання різних методів, з урахуванням специфіки шкідників, кліматичних умов та економічних факторів.

На сьогоднішній день більш перспективним є метод обробки зерна з використанням енергії високої та надвисокої частоти. Характерною особливістю високочастотного нагріву, яка відрізняє його від інших методів, є процес виділення теплової енергії безпосередньо в самій масі матеріалу, що підлягає нагріванню. Зерно та продукти його обробки, а також шкідники, які в ньому присутні, з точки зору фізики є діелектриками, і під час нагрівання енергія електромагнітного поля перетворюється на тепло через діелектричні втрати. Процес утворення тепла при нагріванні в електромагнітному полі

високої частоти залежить від фізичних властивостей матеріалу, зокрема його електричних характеристик. У разі неоднорідного складу матеріалу, як у випадку із зерном, зараженим шкідниками, окремі його частини з різними рівнями провідності нагріватимуться по-різному.

Широкому впровадженню цих технологій заважає нестача високоякісних установок, які здатні ефективно функціонувати в умовах виробництва. Крім того, такі установки мають високу ціну.

Багато досліджень присвячено застосуванню іонізуючих випромінювань для обробки зернових з метою знезараження, основа біологічної дії яких полягає в поглинанні їх енергії, що проявляється через іонізацію і збудження атомів і молекул живої матерії. Іонізація живих клітин призводить до руйнування молекулярних зв'язків і зміни хімічної структури різних сполук.

Зміни в хімічному складі клітини порушують її нормальну діяльність, обмін речовин, поділ та інші процеси, що в результаті веде до її загибелі. Основними недоліками методу променевої обробки зерна є зниження агротехнічних і товарних характеристик зерна при необхідних дозах опромінювання для повної стерилізації мікроорганізмів. До мінусів цього методу також належить необхідність створення спеціальних захисних заходів для персоналу від можливого опромінювання. У сучасних установках товщина захисних шарів складає понад метр бетону і десятки сантиметрів свинцю.

Сучасний етап розвитку сільського господарства характеризується подальшим підвищенням інтенсивності технологічних процесів при забезпеченні високої якості продукції, впровадженням потокових ліній з автоматичним регулюванням процесів та їх повною автоматизацією. В цьому контексті розвиток електрофізичних методів обробки є особливо важливим.

1.2. Електрофізичні методи знезараження зерна

На сьогоднішній день ще не знайдено економічно вигідних та технічно простих способів знезараження зерна. Існуючі методи спрямовані на зменшення

кількості мікроорганізмів у партіях зерна, але хімічні засоби поки що лідирують.

Серед сучасних технологій все більше уваги приділяється електротехнологічним методам. Їх використання в аграрній сфері сприяє зниженню активності шкідливих мікроорганізмів, покращенню якості продукції та її збереженню без необхідності розширення посівних площ. Електрофізичний вплив дозволяє стимулювати біологічні процеси у зерні або пригнічувати розвиток небажаної мікрофлори залежно від параметрів обробки.

Ефективними також є методи термоімпульсної обробки, що включають використання високотемпературного впливу, та плазмові технології, які забезпечують знезараження за рахунок високочастотного розряду. Вони дозволяють значно знизити кількість патогенних мікроорганізмів, однак їх широкому впровадженню заважає висока вартість обладнання та складність у застосуванні.

Електростатичні методи знезараження зерна забезпечують видалення пилу, спор грибів та бактерій із поверхні зерен. Обробка у високовольтному електростатичному полі може підвищити якість зерна за рахунок уповільнення розвитку патогенів, таких як *Fusarium* і *Helminthosporium*. Встановлено, що електростатична обробка ефективна протягом кількох місяців після застосування.

Електрофізичні методи знезараження зерна базуються на застосуванні фізичних факторів, таких як електромагнітні поля різних частот, для знищення або пригнічення розвитку мікроорганізмів, зокрема грибів роду *Aspergillus flavus*, *A. fumigatus*, *Penicillium glaucus*, *Mucor spp.* та *Fusarium spp.*.

Застосування електромагнітних полів високої (ВЧ) та надвисокої частоти (НВЧ) є одним із перспективних методів знезараження зерна. Під впливом цих полів відбувається нагрівання зерна та мікроорганізмів, що призводить до їх загибелі. Дослідження показали, що обробка зерна пшениці ВЧ-полем з частотою 27,12 МГц при температурі 60°C протягом 5 хвилин ефективно знижує кількість грибів роду *Aspergillus* та *Penicillium*.

Інфрачервоне (ІЧ) випромінювання використовується для швидкого нагрівання поверхні зерна, що сприяє знищенню поверхневих мікроорганізмів. Обробка зерна ІЧ-випромінюванням при температурі 70°C протягом 1-2 хвилин може знизити контамінацію грибами роду *Fusarium* та *Mucor*.

Електронно-променева обробка передбачає використання пучків електронів для знезараження зерна. Цей метод ефективний проти широкого спектру мікроорганізмів, включаючи *Aspergillus flavus* та *Fusarium spp.*. Дослідження показали, що доза 10 кГр призводить до значного зниження кількості цих грибів у зерні кукурудзи.

Перевагами електрофізичних методів є відсутність хімічних залишків у зерні після обробки, можливість швидкої обробки великих обсягів продукції та збереження харчової цінності та посівних якостей зерна при правильному виборі режимів обробки.

Однак існують і обмеження, такі як необхідність точного контролю параметрів обробки для запобігання пошкодженню зерна, висока вартість обладнання та енергоспоживання, а також потреба в подальших дослідженнях для оптимізації методів під різні види зернових та мікроорганізмів.

Електрофізичні методи знезараження зерна є перспективним напрямом, що потребує подальших досліджень та вдосконалення для широкого впровадження в агропромисловому секторі.

Озонування є ще одним перспективним методом знезараження зерна. Озон має високі окислювальні властивості, що забезпечують його ефективність у знищенні мікроорганізмів, грибків та їхніх токсинів. Обробка зерна озонованим повітрям дозволяє досягти майже повної стерильності за короткий час. Крім того, озон сприяє збереженню зерна під час зберігання та зменшує витрати на обробку порівняно з хімічними засобами.

Результати досліджень свідчать про високу ефективність перелічених методів у запобіганні розвитку патогенної мікрофлори, однак їхня ефективність значно знижується, якщо зерно вже містить токсини. Таким чином, необхідний

комплексний підхід до обробки зерна, що включатиме як фізичні, так і біологічні методи, адаптовані до умов зберігання та використання.

1.3. Аналіз впливу вологості зерна на його електрофізичні властивості і результати обробки

Впровадженню електрофізичних методів обробки заважає нестача стабільності: однакові режими обробки у різні періоди дають різні результати. Це пояснюється тим, що ефективність обробки залежить не лише від електричних параметрів, а й від численних інших факторів, які не завжди враховуються. Важливу роль відіграють властивості зерна, такі як вологість, температура, запиленість, форма, щільність, хімічний склад та інші характеристики, що впливають на електропровідність зернової маси, а отже, і на результати обробки.

Дослідження електрофізичних властивостей зерна сьогодні є надзвичайно актуальними. Визначення взаємозв'язків між біологічними та електрофізичними характеристиками зерна дозволяє створювати нові ефективні методи стимуляції ростових процесів та знезараження поверхневої мікрофлори.

Серед факторів, що впливають на електропровідність та діелектричну проникність зерна, найважливішим є його вологість [7]. Форми зв'язку води в зернових матеріалах дуже різноманітні, адже зерно є капілярно-пористою структурою і колоїдом за своєю природою. Для таких матеріалів характерні еластичні стінки капілярів, які набухають при зволоженні і стискаються під час висихання. У сухому стані вони стають крихкими. Через складність структури зернових продуктів важко чітко розмежувати різновиди зв'язку води з твердим скелетом зерна. Різні форми зв'язку води та їх неоднорідність спричиняють нелінійну залежність діелектричних властивостей від вологості.

Дослідження показали, що при обробці зерна з вологістю 13,6–14,0% в електричному полі відбувається інтенсивне зарядження, що підсилює поляризацію. Це змінює біопотенціал клітини, спричиняючи її збудження та

активізуючи обмінні процеси не лише на початкових етапах розвитку рослин, але й у наступних фазах онтогенезу.

Вологість зерна також впливає на діелектричну проникність та розподіл електричного поля. Збільшення вологості змінює фізичні властивості зерна та прискорює фізико-хімічні процеси, такі як набухання, гідролітичне розщеплення високомолекулярних сполук і дихання. Це призводить до підвищення діелектричної проникності, значний вплив на яку має вільна вода та хімічні домішки у її складі.

Порівняння експериментальних даних із розрахунками показало збіг лише за умов низької вологості. При вологості понад 13% спостерігається значне розходження, що пояснюється зміною структури водяних включень: за певного рівня вологості утворюються водяні містки, які забезпечують наскрізну провідність. Для харчових продуктів складно вивести фізично обґрунтовані формули, тому часто використовуються емпіричні рівняння, що описують залежність діелектричних властивостей від вологості.

Дослідження частотних характеристик зернових матеріалів показало, що зі зростанням частоти збільшується тангенс кута діелектричних втрат. Електрична неоднорідність структури зерна, механічні переміщення компонентів, адсорбована волога та вплив частоти на поляризацію зумовлюють втрати в діелектриках. Вища вологість сприяє зростанню тангенса кута втрат і діелектричної проникності.

Експериментальні дослідження впливу вологості зерна на електропровідність проводилися на кафедрі "Електроприводу та електротехнологій" Електротехніки, електромеханіки та електротехнологій" НУБіП України. Для досліджень використовували вісім партій ячменю сорту Скарлет із вологістю від 12,6% до 24%. Результати показали, що за вологості до 18,4% питома електропровідність збільшується зі зростанням напруги. При вологості 19% залежність має екстремум, а за вищої вологості спостерігається спадний характер.

Таким чином, для визначення ефективних режимів знезараження зернових необхідно враховувати властивості зернової маси, зокрема її вологість.

1.4. Огляд електротехнологічних засобів з обробки зерна при зберіганні

Аналіз результатів вітчизняних та міжнародних досліджень з використання електрофізичних методів у зерновій галузі виявив суттєве збільшення кількості наукових та практичних розробок за останні десятиріччя. Однак, слід зазначити, що повного вирішення проблеми поки що не досягнуто.

В Україні в результаті розробок, конструкторсько-технологічних удосконалень, а також понад двадцятирічних досвідів і випробувань розроблена, виготовлена та підготовлена до практичного використання «Мікрохвильова установка передпосівної обробки насіння ПАРОСТОК», яка довела свою високу економічну ефективність, перспективність та універсальність. різних насіння агрокультур. Зовнішній вигляд установки зображено на рис. 1.2.



Рис 1.2. Мікрохвильова установка передпосівної обробки насіння

Сутність запропонованої технології полягає в тому, що при мікрохвильовій стимуляції ядра клітини насіння відбувається істотне підвищення його внутрішньої енергії і потенціалу, що в свою чергу призводить до збільшення в 2-4 рази енергії їх проростання і схожості, обсягу (до 3-х разів) та сили кореневої системи (у тому числі перед зимівлею озимих), підвищення морозо- та посухостійкості, скорочення на 10 – 12 днів термінів дозрівання [8].

У Полтавській державній аграрній академії розроблено, виготовлено та впроваджено у виробництво апарат УВЧ-27-60 Полтава. Він призначений для обробки зернових ЕМП ультрависокочастотного поля з експозицією 1–99 хв. Показник питомої витрати електроенергії при обробці становить 6 кВт·год/т.

Потапенко І. А. та інші дослідники розробили спосіб обробки зерна озоном та ряд установок для його здійснення в яких дія магнітного поля підсилюється озоном. На рис. 1.3 представлена схема установки.

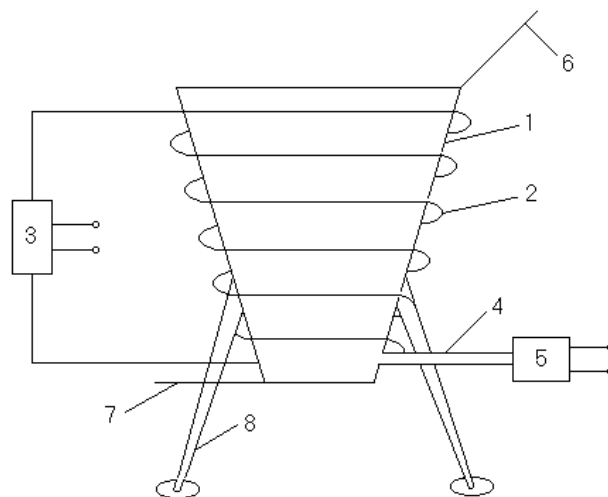


Рис. 1.3. Установка для обробки насіння: 1 – корпус; 2 – обмотка; 3 – джерело постійного струму; 4 – патрубок для подачі озону; 5 – озонатор; 6 – кришка; 7 – засувка; 8 – станина

Цей пристрій має корпус у вигляді зрізаного конуса, до якого знизу прикріплено озонатор. Така форма дозволяє напруженості магнітного поля плавно змінюватися від найменшого до найбільшого значення (і навпаки) в центрі корпусу. Автори вважають, що зерно, проходячи через це поле, отримує потрібну дозу обробки. Також, воно потрапляє під дію іонізованого повітря з

великою кількістю озону (O₃), який вбиває шкідливі мікроби. Перебування зерна в цьому повітрі протягом 4-10 хвилин майже повністю його знезаражує. Дослідники попереджають, що якщо час обробки буде неправильним, це може погіршити схожість насіння.

Інститутом рослинництва ім. В. Я. Юр'єва УААН у співпраці з декількома сільськогосподарськими підприємствами Харківської області розроблено технічний комплекс для обробки насіння сільськогосподарських культур озоном. Типова схема установки представлена на рис. 1.4.

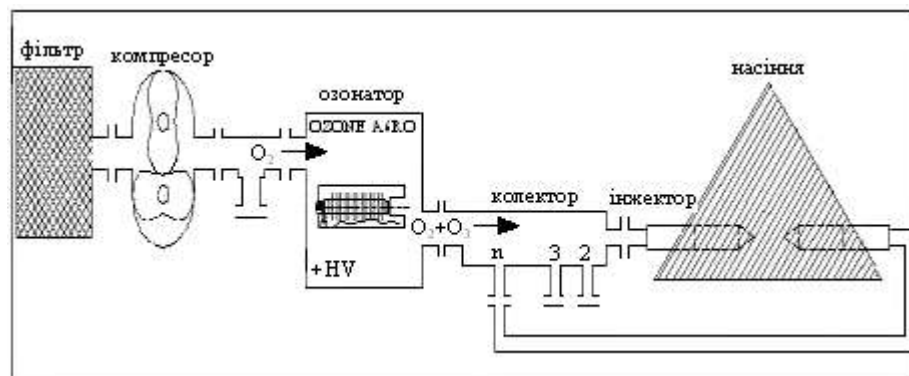


Рис. 1.4. Схема технічного комплексу для обробки зерна озоном

До складу технічного комплексу для обробки зерна озоно-повітряною сумішшю входять наступне обладнання:

- повітряний компресор (типу 12ВФ1,7/1,5 виробництва Мелітопольського компресорного заводу) з повітряним фільтром;
- озонаторна установка типу "OZONE-AGRO 50" з продуктивністю 50 г/год і споживаною потужністю 1300 Вт, вага 45 кг (рис. 1.5);
- колектор розподілу озоно-повітряної суміші;
- пластикові озоностійкі шланги;
- інжектори вводу озоно-повітряної суміші у насіння.



Рис. 1.5. Озонаторна установка "OZONE-AGRO"

Знезараження зерна проводиться в буртах, складських приміщеннях, силосах. За умови застосування однієї озонаторної установки "OZONE-AGRO" об'єм зерна в бурті (складі, силосі) не повинен перевищувати 30 тонн. Перед початком обробки здійснюється підключення озонаторної установки та підготовка буртів із зерном заданої маси, мінімальною площею 12 м² (80x150 см). З метою оптимізації використання озону бурти герметично вкривають полімерною плівкою. Пристрої подачі озono-повітряної суміші розміщують у масі зерна на відстані 5-10 см від основи з інтервалом 80-100 см між ними. Після активації установки та встановлення необхідних параметрів вона функціонує протягом 40-60 хвилин, після чого інжектори переміщують для забезпечення обробки всього об'єму. До обробки зазначеним методом допускається зерно зі стандартною вологістю, що відповідає вимогам актів апробації сортових посівів та фітоекспертизи насіння щодо відсутності збудників сажкових хвороб.

Серед нових альтернативних досліджень у цьому напрямку виділяються роботи з передпосівної обробки насінневого матеріалу в електричному полі високої напруги постійного струму, які були проведені на кафедрі електроприводу та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України. О.М. Берека розробив установку, яка відрізняється від відомих тим, що озон генерується безпосередньо в камері

обробки та не потребує додаткового обладнання. Зовнішній вигляд цієї установки показано на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд установки для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур в електричному полі високої напруженості

Передпосівна обробка насінневого матеріалу, запропонованим способом, дозволяє на 50% зменшити використання хімічних препаратів і підвищити врожайність, але струм провідності, що проходить через зернову масу і є вагомим стимулюючим фактором, є небажаним для знезаражуючої обробки зернової маси при зберіганні. Тому існує потреба додаткового дослідження та удосконалення даного способу обробки при знезаражуючій обробці зернових.

1.5. Сучасні методи отримання озону

Існує кілька методів отримання озону, серед яких найбільш розповсюдженими є: електролітичний, фотохімічний та електросинтез в плазмі газового розряду.

Електролітичний метод синтезу озону реалізується в спеціальних електролітичних осередках. Як електроліти використовуються розчини різних кислот і їх солей. Озон утворюється через розклад води та утворення атомарного кисню, який приєднується до молекули кисню, утворюючи озон і

молекулу водню. Цей метод дозволяє отримати концентрований озон, але він є енергоємним, тому не здобув широкого застосування.

Фотохімічний метод отримання озону є найбільш природним способом. Озон утворюється при дисоціації молекули кисню під впливом короткохвильового ультрафіолетового випромінювання. Цей метод не дозволяє отримати озон високої концентрації. Пристрої, засновані на цьому методі, часто використовуються в лабораторіях, медицині та харчовій промисловості.

Електросинтез озону здобув найбільшу популярність. Цей метод поєднує здатність отримувати озон високих концентрацій з великою продуктивністю і відносно низькими енерговитратами. Наразі для електросинтезу озону найбільше застосовуються бар'єрний, поверхневий та імпульсний розряди.

Окремим напрямом є можливість утворення озону під впливом часткових розрядів, що виникають у повітряних або газових включеннях, які неминуче утворюються під час виготовлення або експлуатації твердих діелектриків. Оскільки діелектрична провідність газу в включенні значно менша, ніж у діелектрика, що його оточує, то при прикладенні напруги напруженість поля в включенні може значно перевищити середню напруженість поля в діелектрику, що призводить до виникнення часткового розряду. Під впливом часткового розряду відбуваються хімічні реакції утворення активних продуктів (озону, окислів азоту), які негативно впливають на ізоляцію та струмоведучі частини.

У дослідженнях проведених О.М. Берекою на кафедрі електроприводу та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України виявлено, що в повітряних включеннях зернової маси, що знаходиться в електричному полі високої напруженості також виникають часткові розряди під дією яких проходять хімічні реакції утворення озону. Наукові дослідження в цьому напрямі ведуться з 2001 р. [9].

Механізм виникнення та проходження часткових розрядів у насінневій масі має значно складніший характер у порівнянні з твердими діелектриками. Це пов'язано, в першу чергу, з великою кількістю повітряних включень та

розбіжністю у їх розмірах, а також зміною фізичних характеристик зернової маси (вологості, температури).

У результаті проведених досліджень було розроблено еквівалентну електричну схему насінневої маси (рис. 1.7), на основі якої було пояснено процеси, що протікають в ній під дією електричного поля високої напруженості постійного струму.

Насіння при постійній напрузі має відповідний опір, що значною мірою залежить від вологості насіння (W) і температури (t), і визначає струм провідності. Повітряні включення та насіння формують ланцюги з опорів і ємностей. На схемі $R1$ — опір насіння, розташованого між електродами, $R3_i$, $C3_i$ — опір і ємність повітряного включення, $R2_i$ і $R4_i$ — опори частини насіння, що знаходиться послідовно з повітряним включенням.

Опір $R1$ визначає величину струму провідності (I_p). Опір повітряного включення є нелінійним і залежить від напруженості на ньому (U_c), змінюючись під час іонізаційних процесів. Коли напруга на повітряному проміжку менша за пробивну, його опір значно більший за опір насіння ($R3 \gg R1$). Таким чином, насінневу масу можна уявити як велику кількість ланцюгів з $R2_i$, C_i і $R4_i$.

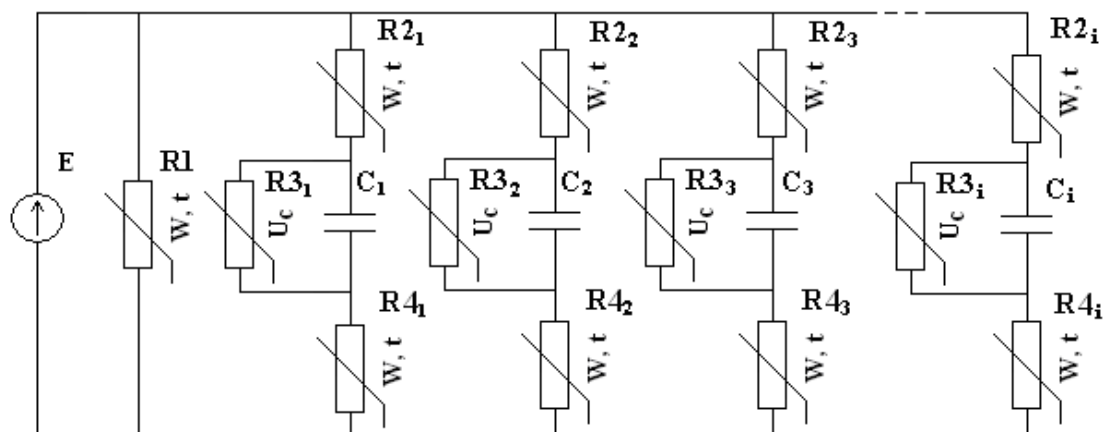


Рис. 1.7. Еквівалентна електрична схема насінневої маси: $R1$ – опір насіння, яке розташоване між електродами; $R3_i$, C_i – опір і ємність повітряного

включення; $R2_i$, $R4_i$ – опори частини насіння, яке розташовано послідовно з повітряним включенням

При подачі напруги на пластинчасті електроди, між якими знаходиться шар насіння, протягом певного часу відбуватиметься зарядка ємності C_i . Коли напруженість досягне відповідного значення, виникає частковий розряд цієї ємності. Час розряду буде дуже коротким (приблизно 10^{-8} с), після чого розряд згасає. Під впливом часткового розряду частина кисню (O_2) переходить у свою змінену форму — озон (O_3). Інтенсивність часткових розрядів у насіннєвій масі залежатиме не тільки від напруженості електричного поля, але й від виду сільськогосподарської культури та її характеристик.

У загальному об'ємі зернової маси, що знаходиться між плоскими паралельними електродами, часткові розряди відбуватимуться наступним чином: при прикладенні високої напруги до електродів виникає частковий розряд у повітряних включеннях, де нерівномірність розподілу напруженості електричного поля є найбільшою. З підвищенням прикладеної напруги часткові розряди виникають у все більшій кількості повітряних включень, причому величина імпульсу часткового розряду в наступних буде більшою, ніж у попередніх. Крім того, інтенсивність часткових розрядів зростатиме в тих включеннях, де вони почалися при менших напругах.

Цей напрям є дуже перспективним, оскільки зникає потреба у використанні додаткового обладнання для виробництва та подачі озону.

1.6. Висновки до розділу 1

Аналіз наукових джерел підтверджує гостроту проблеми збереження зерна, оскільки щорічні втрати в Україні сягають 5% врожаю через розвиток мікроорганізмів. Хімічні методи знезараження, попри їх домінування, мають суттєві недоліки, пов'язані з екологічною безпекою. Електрофізичні методи обробки є перспективною альтернативою завдяки відсутності хімічних

залишків у продукції. Встановлено, що вологість зерна критично впливає на ефективність електрофізичної обробки через зміну електропровідності зернової маси. Найбільш перспективною є технологія поєднання впливу електричного поля високої напруженості з генерацією озону безпосередньо в масі зерна за рахунок часткових розрядів у повітряних включеннях, що спрощує процес знезараження та зменшує енерговитрати.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗНЕЗАРАЖУЮЧОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1. Теоретичні дослідження електричних розрядів в повітрі

Одним із основних агротехнічних заходів у вирощуванні зернових культур є обробка для знищення шкідливих організмів. Існує багато методів такої обробки, але, як зазначено в першому розділі цієї роботи, останнім часом значну увагу приділяють новим електротехнологічним підходам, серед яких перспективним є використання електричного поля високої напруги змінного струму. Ми розглянемо процеси, що відбуваються у зерновій масі під впливом електричного поля високої напруги змінного струму.

Зернова маса є сумішшю зерен і повітря, при природних умовах зберігання зернової суміші частина об'єму, заповнена зерном, становить 50-70%, а решта — повітря. Тому спочатку розглянемо процеси утворення і проходження розрядів у повітрі під впливом електричного поля високої напруги змінного струму.

Виникнення електричних розрядів у повітрі можливе за умови наявності в ньому певної кількості заряджених частинок, які визначають його електропровідність[10]. За звичайних умов в 1 м³ атмосферного повітря кількість заряджених частинок (іонів газів або твердих домішок, що знаходяться у зваженому стані) не перевищує 10¹³, що недостатньо для виникнення розряду. Збільшення кількості заряджених частинок можливе завдяки іонізації молекул повітря.

Якщо у слабких електричних полях іонізація молекул можлива лише завдяки зовнішньому впливу, то в сильних виникають нові явища, пов'язані з іонізаційними процесами. На рис. 2.1 представлено залежність густини струму у повітрі при підвищенні напруженості електричного поля (рис 2.1).

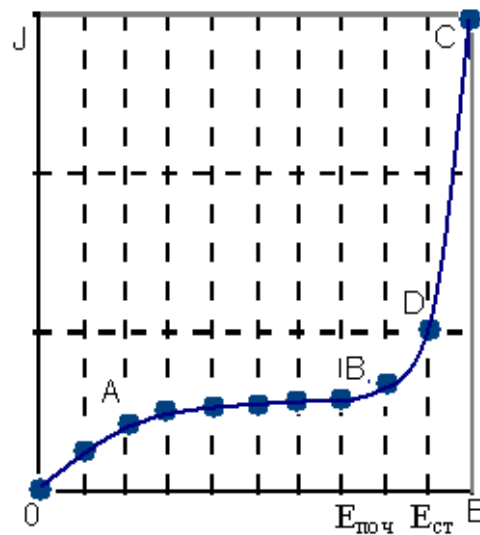


Рис. 2.1. Залежність густини струму у повітрі від напруженості електричного поля (схематично)

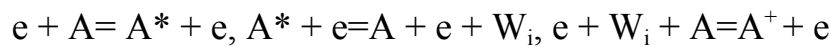
Перша ділянка (0A на рис. 2.1) – лінійна залежність. Густина струму в повітрі, при малих значеннях зовнішнього електричного поля, прямо пропорційна напруженості прикладеного поля. Фізичний процес на цій ділянці відбувається відповідно до закону Ома.

Друга ділянка – ділянка насичення (AB на рис. 2.1). Тут виникає струм насичення, при якому його густина є дуже малою і не зростає при збільшенні напруженості поля. Для повітря та очищених газів $J_{нас}$ не перевищує $10^{-16} \dots 10^{-14}$ А/м². При такій напруженості поля закон Ома вже не виконується.

Третя ділянка (BC на рис. 2.1) – експоненціальне зростання, де крива залежності J від E різко підвищується. У цій області значно зростають діелектричні втрати. Причина цього – поява заряджених частинок у проміжку через новий механізм – ударну іонізацію. Кількість електронів та іонів у проміжку збільшується завдяки зіткненню електронів з високою енергією з нейтральними молекулами. При цьому в кожному акті іонізації витрачається енергія іонізації W . Характерні значення енергії іонізації залежать від типу молекули і становлять 12.5 еВ (для кисню).

Коли кінетична енергія налітаючого електрона $mV^2/2 > W$ енергія іонізації, іонізація відбувається по схемі $e+A = A^+ + e + e$, де A молекула або атом газу.

Якщо ж кінетична енергія налітаючого електрона $W > mV^2/2 > W_{зб}$, то можливі наступні схеми:



де A – молекула або атом газу;

A^* – молекула в збудженому стані;

W_i – енергія іонізації.

За нормальних умов початок розвитку ударної іонізації відбувається близько 10 кВ/см.

Внаслідок ударної іонізації в повітряних включеннях виникає самостійний розряд, що призводить до розподілу зарядів, носіями яких є електрони та позитивні і негативні іони. Під впливом електричного поля заряди рухаються в протилежних напрямках і осідають на поверхні зернин. Електричне поле, створене цими зарядами, протилежне за напрямком до зовнішнього поля, і сумарна напруженість стає недостатньою для виникнення подальших розрядів. Тривалість цього процесу (одного часткового розряду), викликаного одиничним електроном, перебуває в межах наносекундного діапазону.

Внаслідок осідання зарядів на поверхні зернин знижується напруженість поля, для компенсації якої напруга на електродах повинна бути збільшена. Якщо після часткового розряду напруга не змінюється, то проміжок залишатиметься замкнутим до того моменту, поки заряд, що осів, не зменшить свою величину за рахунок провідності зернин. При змінній напрузі, через зміну полярності зовнішнього поля, сумарне поле посилюється полем осілих зарядів, і наступний розряд відбувається при меншому значенні прикладеної напруги. Процес розвитку розряду при змінній напрузі відображений на рис. 2.2.

Змінна напруга U прикладена до електродів. На повітряне включення діє частина цієї напруги U_p , яка без розряду мала б вигляд синусоїди, зображеної штриховою лінією. Однак, досягнувши початкової напруги, відбувається розряд, і напруга в повітряному включенні знижується на певну величину. Це зниження компенсується подальшим зростанням прикладеної напруги. Процес повторюється до тих пір, поки напруга U не перейде через максимум.

У наступні півперіоди розряд починатиметься при нижчих значеннях напруги, і зміни напруги в повітряному проміжку будуть відображатися кривою U_r .

Після того як на поверхні зернин осідає заряд, не можна вважати, що розвиток подальших розрядів відбувається в однорідному полі. Як показали дослідження, заряд осідає на поверхні компактно, займаючи області розміри яких складають міліметровий діапазон. Напруженість поля в середині та на краю таких областей різна за величиною і напрямком, а щільність заряду в них при умовах, близьких до нормальних, складає величину порядку 10^{-9} Кл/см².

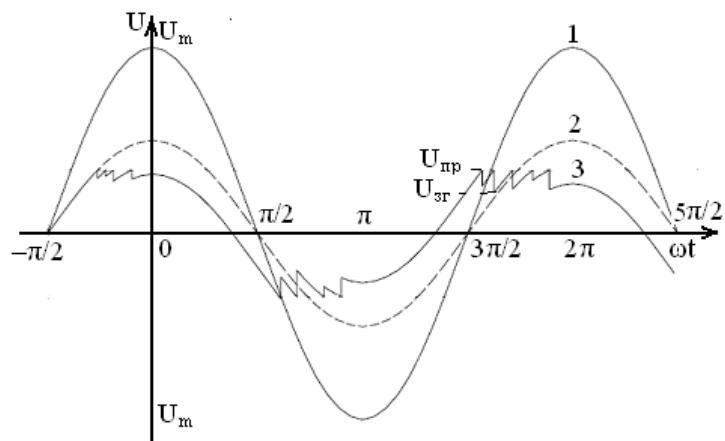


Рис.2.2. Графік зміни напруги (крива 3) на повітряному включенні з часом у результаті виникнення розрядів (крива 1 відповідає $U_m \cos \omega t$, а крива 2 – $U_m \cos \omega t$ з врахуванням ємностей повітряного включення і діелектрика)

Розвиток розряду буде відбуватися вздовж поверхні твердого діелектрика. При цьому твердий діелектрик на певний період виконуватиме роль

електростатичного генератора, а характеристики розряду будуть переважно залежати від таких параметрів діелектрика, як питомі подовжня і поперечна ємності, провідність і теплопровідність. Ця фаза розряду займає приблизно 10% від загальної тривалості періоду прикладеної напруги. Якщо твердий діелектрик, який обмежує розрядний струм, покриває тільки один електрод, а другий залишиться без покриття, на ньому не осідатиме заряд і не виникатиме подібна область.

У той же час у розрядному проміжку розвивається велика кількість розрядів. За даними різних дослідників, їх може бути до десяти мікророзрядів на одному квадратному сантиметрі поверхні. Це ускладнює загальну картину, але не змінює її суті.

Наприклад, наявність сусідніх із зоною заряду інших подібних зон змінює характер вторинних розрядів.

У процесі ударної іонізації відбуваються електрохімічні реакції, результатом яких є утворення озону та його розпад. Процес утворення озону включає кілька етапів, хоча в загальному випадку кількість реакцій, пов'язаних з утворенням озону і його розпадом, перевищує 70. Крім того, утворюються оксиди азоту, які виступають природними каталізаторами реакцій утворення озону.

2.2. Розрахунок повного струму, що проходить через зернову масу під впливом змінного електричного поля високої напруженості

У зерновій масі, що знаходиться в електричному полі високої напруженості змінного струму, відбуваються процеси електричних розрядів, для пояснення яких була розроблена схема заміщення (рис. 2.3).

Кожен елемент зернової маси (зерно, повітря) має свій власний опір та ємність. Причому опір самого зерна може значно змінюватися в залежності від його вологості (W) та температури (t). Значення струму, який проходить через зернову масу, залежить від напруги на високовольтних електродах, сумарного

опору діелектричних пластин, що розділяють зернову масу від електродів, а також від опору самого зерна.

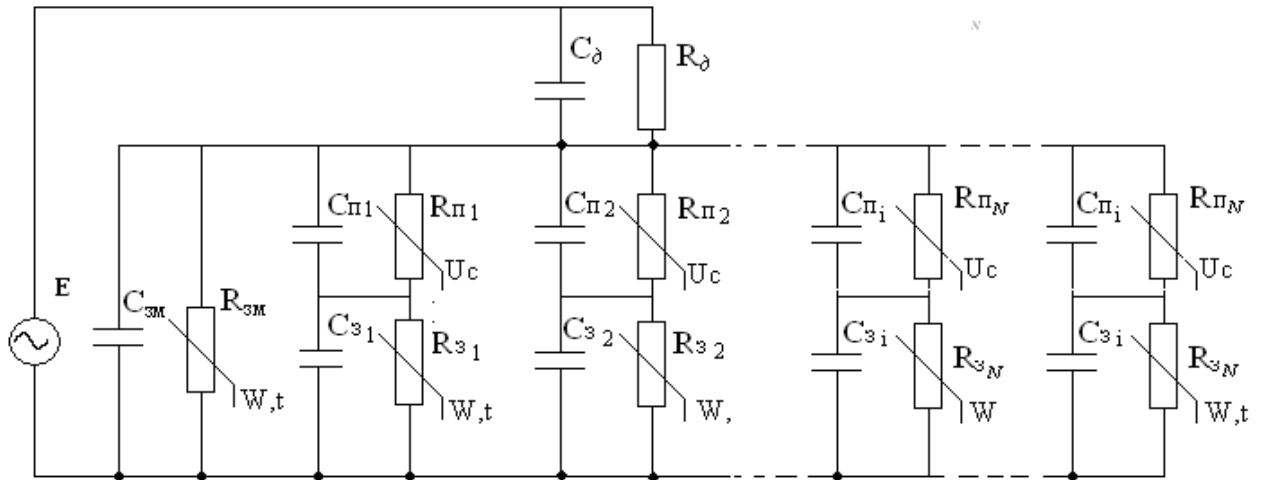


Рис. 2.3. Електрична схема заміщення зернової маси, що знаходиться в електричному полі високої напруженості: $R_{зм}, C_{зм}$ – опір та ємність зернової маси; $C_{д}, R_{д}$ – ємності та опори діелектричних пластин; $C_{зi}, R_{зi}$ – ємності і опори зернин, які розташовані послідовно з повітряним включенням; $C_{пi}, R_{пi}$ – ємність і опір повітряного включення, де $i=1, 2 \dots N$, N – кількість паралельних ланцюгів

Опір повітряного міжзернового проміжку змінюється залежно від прикладеної напруги U_p . Коли напруга невелика ($U_p < U_{пр}$, де $U_{пр}$ — пробивна напруга), опір повітряного включення значно вищий за опір зерна, що його оточує. При досягненні напругою значення пробивної напруги $U_p = U_{пр}$, виникає розряд, і в повітряному включенні утворюються іони.

На електричній еквівалентній схемі зернова маса представлена як велика кількість віток, що складаються з опорів та ємностей, які утворюють діелектричні пластини, зерно та повітряні включення.

Розглянемо розрядні процеси на прикладі однієї вітки зернової маси. Кожна вітка складається з опорів і ємностей, що представляють зерно, повітряні включення та діелектричні пластини. При підвищенні напруги на вітці, опір повітряного проміжку змінюється в залежності від величини прикладеної напруги. Спочатку, при невеликих значеннях напруги, опір повітряного

проміжку значно вищий за опір зерна, і струм через цю вітку практично не проходить.

Якщо ж напруга досягає пробивного значення, виникає електричний розряд, і в повітряному включенні утворюються іони. Це призводить до зниження опору між зерном та повітряним включенням, і через вітку починає проходити струм. У цей момент відбувається зміна енергетичних характеристик вітки, оскільки розряд змінює не тільки опір, а й ємність проміжку між зернами, впливаючи на загальну електричну поведінку системи.

При підключенні змінної напруги до електродів на першому півперіоді ємність повітряного включення C_{ni} буде поступово заряджатися, і коли напруга досягне певного пробивного рівня, відбудеться частковий розряд.

Розряд, що відбувається в повітряному включенні, спричиняє утворення вільних заряджених частинок (іонів та електронів). Під впливом електричного поля позитивно та негативно заряджені частинки рухаються в протилежні напрямки до країв повітряного включення, де вони осідають на поверхні зернин, що оточують це включення, утворюючи шар зарядів. Ці заряди створюють електричне поле, лінії сил якого спрямовані протилежно основному полю, що знижує загальну напруженість поля в включенні.

При розряді напруга на i -му включенні не падає до нуля, а знижується до значення $U_{n.zgi}$ (напруга загасання розряду), яке зазвичай є лише трохи меншим за напругу розряду, $U_{n.zgi} = (0,7-0,9)U_{n.npi}$. Після завершення розряду напруга на включенні починає зростати згідно з законом, що відповідає зміні прикладеної напруги, зміщеній на значення постійної складової, що виникає через наявність зарядів на поверхні включення. Коли напруга на ємності C_{ni} досягає значення $U_{n.npi}$, процес повторюється.

Отже, розряди в повітряному включенні повторюються через певні інтервали часу, що відповідають змінам напруги на включенні C_{ni} від значення $U_{n.npi}$ до $U_{n.zgi}$. Однак адсорбовані заряди, що залишаються на поверхні після попереднього періоду, спотворюють поле в включенні і сприяють виникненню розрядів при інших значеннях $U_{n.npi}$ та $U_{n.zgi}$. Це пояснюється тим, що час

релаксації зарядів у зерновій масі значно перевищує час тривалості півперіоду напруги. Зі збільшенням часу релаксації частота розрядів значно зменшується.

Часткові розряди зникають коли значення напруги досягає максимуму і знову виникають після зміни напруги на електродах на значення ΔU , що відповідає зміні напруги на i -му включенні $\Delta U_{ni} = U_{n.npi} - U_{n.zzi}$, причому ΔU і ΔU_{ni} зв'язані співвідношенням:

$$\Delta U = \frac{C_{\delta} + C_{zi} + C_{ni}}{C_{\delta} + C_{zi}} \cdot \Delta U_{ni}, \quad i=1,2 \dots N. \quad (2.1)$$

Якщо напруга, що подається на електроди змінюється за виразом $U = U_m \sin \omega t$, то напруга на включенні U_{ni} дорівнює:

$$U_{ni} = U_m \frac{C_{\delta} + C_{zi}}{C_{\delta} + C_{zi} + C_{ni}}, \quad i=1,2 \dots N. \quad (2.2)$$

Тоді число часткових розрядів m в i -му включенні за один півперіод дорівнює:

$$m_i = \frac{2 \left(\frac{C_{\delta} + C_{zi}}{C_{\delta} + C_{zi} + C_{ni}} U_m - U_{zzi} \right)}{U_{npi} - U_{zzi}}, \quad i=1,2 \dots N, \quad (2.3)$$

де U_{npi} і U_{zzi} – напруга на електродах при виникненні розряду та загасанні розряду у i -му повітряному включенні зернової маси.

Для обчислення пробивної напруги повітряного проміжку між зернами, що розглядаються як неідеальні діелектрики, можна використати емпірично визначені формули. Значення цієї напруги залежить від форми, розміру зерен та відстані між ними, а також від відносної густини повітря. Наприклад, для сферичних зерен амплітудне значення пробивної напруги дорівнює:

$$U_{npi} = \frac{E_0 L}{z}, \quad \text{кВ},$$

де E_0 – максимальна напруженість електричного поля, при якій починається розряд, кВ/см; L – відстань між зернами, см; z – геометричний коефіцієнт, що враховує зниження розрядної напруги із-за неоднорідності поля.

Максимальна напруженість електричного поля, при якій починається розряд, E_0 можна розрахувати за формулою:

$$E_0 = 27,2\delta\left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{r\delta}}\right),$$

де r – кривизна поверхонь зернин, см; δ – відносна густина повітря, яка залежить від тиску та температури повітря $\delta = 0,385 \frac{P}{T}$ і за нормальних умов дорівнює 1.

Коефіцієнт z , що враховує неоднорідність поля, визначається в залежності від відстані між електродами та кривизни їх поверхні:

$$z = \frac{1}{4} \left[\frac{L}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{L}{r} + 1\right)^2 + 8} \right].$$

Кількості часткових розрядів $n_{\text{пр}i}$, у i -му повітряному включенні за 1с. визначається за виразом:

$$n_{\text{пр}i} = 2fm_i, \quad (2.4)$$

де f – частота мережі; m_i – число часткових зарядів в i -му повітряному включенні за один період.

Пробій повітряного включення в зерновій масі завжди супроводжуватиметься нейтралізацією певної кількості зарядів. $U_{\text{н.пр}i}C_{\text{н}i}$. Під час розряду у повітряних включеннях загальна ємність зернової маси збільшується, що призводить до зменшення напруги на електродах, і для її відновлення потрібен додатковий заряд ΔQ_i . Для одного розряду:

$$\Delta Q_i = U_{\text{н.пр}i} \cdot (C_\delta + C_{\text{з}i}). \quad (2.5)$$

Оскільки значення зарядів та частота їх проходження змінюються в певні проміжки часу, для оцінки їх інтенсивності можна використати інтегральний параметр — середній розрядний струм, який визначається кількістю заряду, що нейтралізується в повітряному включенні за одну секунду:

$$I_{\text{ср}i} = n_{\text{пр}i} \cdot \Delta Q_i. \quad (2.6)$$

Враховуючі співвідношення (2.3), (2.4) та (2.6), розрядний струм для будь-якого i -ого ланцюга зернової маси буде визначатися наступним чином:

$$I_{cpi} = 2f \frac{2 \left(\frac{C_\delta + C_{zi}}{C_\delta + C_{zi} + C_{ni}} U_m - U_{zci} \right)}{U_{npi} - U_{zci}} \cdot U_{npi} (C_\delta + C_{zi}), \quad i=1,2 \dots N. \quad (2.7)$$

На відміну від постійних електричних полів, у змінних електричних полях слід враховувати струм зміщення, який може значно впливати на розподіл поля в багатошаровому діелектрику (рис. 2.4).

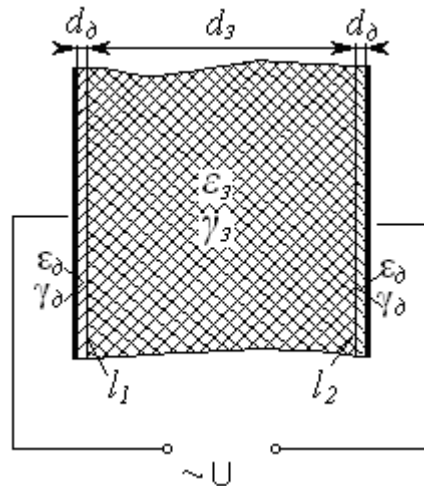


Рис. 2.4. Багатошаровий діелектрик (зернова маса-діелектричні пластини) в електричному полі: ϵ_δ , γ_δ , d_δ , ϵ_3 , γ_3 , d_3 – діелектрична проникність, питома електропровідність, товщина діелектричних пластин та зернової маси.

Припустимо, що багатошаровий діелектрик не є ідеальним, тобто його електрофізичні властивості залежать від діелектричної проникності та питомої електропровідності. Якщо геометричні розміри пластин значно більші за відстань між ними, то електричне поле між пластинами можна вважати однорідним.

У початковий момент часу, тобто коли на електродах з'явиться початкова густина заряду, напруженість електричного поля в діелектричних пластинах E_δ^0 та зерновій масі E_3^0 розподілиться відповідно діелектричним проникностям:

$$\frac{E_\delta^0}{E_3^0} = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_\delta}. \quad (2.8)$$

Проте через різну питому електропровідність і діелектричну проникність шарів, розподіл поля почне змінюватися. Густина струму в діелектричних пластинах j_δ та зерновій масі j_3 буде визначатися за законом Ома:

$$j_\delta = \gamma_\delta E_\delta + \epsilon_\delta \frac{dE_\delta}{dt} \quad \text{та} \quad j_3 = \gamma_3 E_3 + \epsilon_3 \frac{dE_3}{dt}. \quad (2.9)$$

Для того, щоб визначити напруженість електричного поля в кожному шарі та загальний струм, скористаємося умовою неперервності загального струму:

$$j = \gamma_{\delta} E_{\delta} + \varepsilon_{\delta} \frac{dE_{\delta}}{dt} = \gamma_{\zeta} E_{\zeta} + \varepsilon_{\zeta} \frac{dE_{\zeta}}{dt} \quad \text{на } l_1, l_2, \quad (2.10)$$

де l_1, l_2 – границі між діелектричними пластинами та зерновою масою (рис. 2.4).

Залежність напруженості електричного поля в кожному шарі від часу можна представити наступними виразами [143]:

$$\vec{E}_{\delta} = \vec{E}_{\delta m} e^{i\omega t} \quad \text{та} \quad \vec{E}_{\zeta} = \vec{E}_{\zeta m} e^{i\omega t}, \quad (2.11)$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; ω – кутова частота, с^{-1} ; t – час, с .

При цьому слід враховувати, що $\vec{E}_{\delta m}$ та $\vec{E}_{\zeta m}$ є комплексними величинами і повинні розглядатися як залежні від часу. Невідомо, як саме будуть змінюватися напруженості поля в кожному шарі з часом, однак очевидно, що ці зміни будуть складнішими, ніж періодичні коливання прикладеної напруги. Це можна стверджувати на основі явищ, що відбуваються в багатошаровому конденсаторі з провідністю діелектричних шарів між його обкладинками при постійній напрузі. Крім того, необхідно врахувати можливий зсув фаз між напруженістю поля в шарі та напругою, що прикладена до електродів, тому $\vec{E}_{\delta m}$ та $\vec{E}_{\zeta m}$ слід вважати комплексними.

Інше рівняння, яке разом з виразом (2.10) дозволяє визначити залежність \vec{E}_{δ} і \vec{E}_{ζ} від часу при включенні напруги, може бути записане у такому вигляді:

$$U_m e^{i\omega t} = 2\vec{E}_{\delta m} e^{i\omega t} d_{\delta} + \vec{E}_{\zeta m} e^{i\omega t} d_{\zeta}, \quad (2.12)$$

або

$$U_m = 2\vec{E}_{\delta m} d_{\delta} + \vec{E}_{\zeta m} d_{\zeta}, \quad (2.13)$$

де U_m – комплексна амплітуда напруги, В; ω – кругова частота; $i = \sqrt{-1}$.

Після підстановки в рівняння (2.10) виразів (2.11) для \vec{E}_{δ} та \vec{E}_{ζ} отримаємо наступне диференціальне рівняння:

$$\gamma_{\delta} \vec{E}_{\delta m} e^{i\omega t} + \varepsilon_{\delta} i\omega \vec{E}_{\delta m} e^{i\omega t} + \varepsilon_{\delta} \frac{d\vec{E}_{\delta m} e^{i\omega t}}{dt} = \gamma_{\zeta} \vec{E}_{\zeta m} e^{i\omega t} + \varepsilon_{\zeta} i\omega \vec{E}_{\zeta m} e^{i\omega t} + \varepsilon_{\zeta} \frac{d\vec{E}_{\zeta m} e^{i\omega t}}{dt}. \quad (2.14)$$

В цьому рівнянні члени $\varepsilon_{\delta} i\omega \vec{E}_{\delta m} e^{i\omega t}$ і $\varepsilon_{\zeta} i\omega \vec{E}_{\zeta m} e^{i\omega t}$ являються комплексними виразами густини ємнісних струмів, що обумовлені періодичними змінами

прикладеної напруги. Члени $\varepsilon_{\partial} \frac{dE_{\partial m}}{dt} e^{i\omega t}$ та $\varepsilon_{\zeta} \frac{dE_{\zeta m}}{dt} e^{i\omega t}$ являються комплексними виразами густини ємнісних струмів, що обумовлені зміною напруженості електричного поля в шарах із-за перерозподілу поля.

Розділивши вираз (2.14) на $e^{i\omega t}$ і здійснивши перетворення, отримуємо:

$$\mathbb{J} = (\gamma_{\partial} + i\omega\varepsilon_{\partial})\mathbb{E}_{\partial m} + \varepsilon_{\partial} \frac{d\mathbb{E}_{\partial m}}{dt} = (\gamma_{\zeta} + i\omega\varepsilon_{\zeta})\mathbb{E}_{\zeta m} + \varepsilon_{\zeta} \frac{d\mathbb{E}_{\zeta m}}{dt}. \quad (2.15)$$

Коефіцієнти при $\mathbb{E}_{\partial m}$ та $\mathbb{E}_{\zeta m}$ – це комплексні значення повних провідностей шарів при змінній напрузі або комплексній провідності:

$$\bar{\gamma}_{\partial} = \gamma_{\partial} + i\omega\varepsilon_{\partial} \quad \text{та} \quad \bar{\gamma}_{\zeta} = \gamma_{\zeta} + i\omega\varepsilon_{\zeta}. \quad (2.16)$$

Таким чином, рівняння (2.15) запишеться у вигляді:

$$\bar{\gamma}_{\partial}\mathbb{E}_{\partial m} + \varepsilon_{\partial} \frac{d\mathbb{E}_{\partial m}}{dt} = \bar{\gamma}_{\zeta}\mathbb{E}_{\zeta m} + \varepsilon_{\zeta} \frac{d\mathbb{E}_{\zeta m}}{dt}. \quad (2.17)$$

Із рівняння (2.13) знаходимо:

$$\mathbb{E}_{\zeta m} = \frac{U_m - 2\mathbb{E}_{\partial m}d_{\partial}}{d_{\zeta}}. \quad (2.18)$$

Підставивши отримане значення $\mathbb{E}_{\zeta m}$ в (2.17), отримуємо наступне диференціальне рівняння:

$$(\bar{\gamma}_{\partial}d_{\zeta} + 2\bar{\gamma}_{\zeta}d_{\partial})\mathbb{E}_{\partial m} + (\varepsilon_{\partial}d_{\zeta} + 2\varepsilon_{\zeta}d_{\partial})\frac{d\mathbb{E}_{\partial m}}{dt} = \bar{\gamma}_{\zeta}U_m. \quad (2.19)$$

Рішення рівняння (2.19) шукаємо у вигляді $\mathbb{E}_{\partial m} = \mathbb{E}_{\partial m}^{zp} + \mathbb{E}_{\partial m}^{np}$, де $\mathbb{E}_{\partial m}^{zp}$ – загальне рішення однорідного диференціального рівняння, що відповідає рівнянню (2.19); $\mathbb{E}_{\partial m}^{np}$ – приватне рішення диференціального рівняння (2.19).

Загальне рішення $\mathbb{E}_{\partial m}^{zp}$ шукаємо у вигляді

$$\mathbb{E}_{\partial m}^{zp} = Ae^{pt}, \quad (2.20)$$

де A – поки ще невідома константа; p – параметр перехідного процесу.

Записуємо характеристичне рівняння:

$$(\bar{\gamma}_{\partial}d_{\zeta} + 2\bar{\gamma}_{\zeta}d_{\partial})\mathbb{E}_{\partial m} + (\varepsilon_{\partial}d_{\zeta} + 2\varepsilon_{\zeta}d_{\partial}) \cdot p = 0. \quad (2.21)$$

Звідки знаходимо параметр перехідного процесу:

$$p = -\frac{\bar{\gamma}_\delta d_\delta + 2\bar{\gamma}_z d_\delta}{\varepsilon_\delta d_\delta + 2\varepsilon_z d_\delta} \quad (2.22)$$

Для знаходження постійної A використовуємо вираз (2.13), який запишемо для часу $t=0$:

$$U_m^{(0)} = 2\bar{E}_{\delta m}^{(0)} d_\delta + \bar{E}_{zm}^{(0)} d_z \quad (2.23)$$

Враховуючи те, що

$$\varepsilon_\delta \bar{E}_{\delta m}^{(0)} = \varepsilon_z \bar{E}_{zm}^{(0)}, \quad (2.24)$$

з рівняння (2.23) знаходимо початкове значення для напруженості електричного поля в діелектричній пластині

$$\bar{E}_{\delta m}^{(0)} = \frac{\varepsilon_z U_m^{(0)}}{\varepsilon_\delta d_\delta + 2\varepsilon_z d_\delta} \quad (2.25)$$

Для знаходження приватного рішення диференційного рівняння (2.19) розглянемо момент часу $t=\infty$. В цьому випадку відповідно до умови безперервності повного струму, запишемо:

$$\bar{J}_{\delta m} = \bar{J}_{zm} \quad \text{на } l_1, l_2, \quad (2.26)$$

де $\bar{J}_{\delta m}$ та \bar{J}_{zm} – густина комплексної амплітуди повного струму в діелектричних пластинах та зерновій масі.

Враховуючи, що повний струм у квазістаціонарному режимі визначається за формулою $\bar{J}_m = \gamma \bar{E}_m + i\omega \varepsilon \bar{E}_m$, граничні умови (2.26) запишемо у вигляді:

$$(\gamma_\delta + i\omega \varepsilon_\delta) \bar{E}_{\delta m}^{np} = (\gamma_z + i\omega \varepsilon_z) \bar{E}_{zm}^{np} \quad \text{на } l_1, l_2, \quad (2.27)$$

або

$$\bar{\gamma}_\delta \bar{E}_{\delta m}^{np} = \bar{\gamma}_z \bar{E}_{zm}^{np} \quad \text{на } l_1, l_2, \quad (2.28)$$

де $\bar{E}_{\delta m}^{np}$ та \bar{E}_{zm}^{np} – комплексна амплітуда напруженості електричного поля в діелектричних пластинах та зерновій масі для усталеного режиму.

Користуючись граничними умовами (2.28) і співвідношенням (2.13), знаходимо напруженість електричного поля в усталеному режимі, тобто приватне рішення рівняння (2.19):

$$\bar{E}_{\delta m}^{np} = \frac{\bar{\gamma}_z U_m^{(0)}}{2\bar{\gamma}_z d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_z} \quad (2.29)$$

Таким чином, напруженість електричного поля в діелектричній пластині визначається за виразом:

$$\vec{E}_{\text{dm}}(t) = Ae^{pt} + \vec{E}_{\text{dm}}^{\text{np}}. \quad (2.30)$$

Знайдемо комплексну константу A із початкової умови (2.25):

$$\frac{\varepsilon_3 \vec{U}_m}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma} = A + \vec{E}_{\text{dm}}^{\text{np}}. \quad (2.31)$$

Звідки:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\varepsilon_3 \vec{U}_m}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma} - \frac{\bar{\gamma}_3 \vec{U}_m}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma} = \frac{2\bar{\gamma}_3 d_\delta \varepsilon_3 + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma \varepsilon_3 - 2\bar{\gamma}_3 d_\delta \varepsilon_3 - \bar{\gamma}_3 d_\gamma \varepsilon_\delta}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma)} \vec{U}_m = \\ &= \frac{\bar{\gamma}_\delta d_\gamma \varepsilon_3 - \bar{\gamma}_3 d_\gamma \varepsilon_\delta}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma)} \vec{U}_m. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Таким чином, комплексна амплітуда напруженості електричного поля у діелектричних пластинах знаходиться так:

$$\vec{E}_{\text{dm}} = \frac{(\bar{\gamma}_\delta \varepsilon_3 - \bar{\gamma}_3 \varepsilon_\delta) d_\gamma \vec{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma)} \exp\left[\frac{\bar{\gamma}_\delta d_\gamma + 2\bar{\gamma}_3 d_\delta}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma} t\right] + \frac{\bar{\gamma}_3 \vec{U}_m}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma}. \quad (2.33)$$

Далі, використовуючи співвідношення (2.12) знаходимо:

$$\vec{E}_{\text{zm}} = \frac{(-\bar{\gamma}_\delta \varepsilon_3 + \bar{\gamma}_3 \varepsilon_\delta) 2d_\delta \vec{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma)} \exp\left[\frac{\bar{\gamma}_\delta d_\gamma + 2\bar{\gamma}_3 d_\delta}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma} t\right] + \frac{\bar{\gamma}_\delta \vec{U}_m}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma}. \quad (2.34)$$

Переходимо до рівнянь для визначення миттєвих значень напруженості електричного поля \vec{E}_δ і \vec{E}_γ :

$$\vec{E}_\delta = \frac{(\varepsilon_3 \gamma_\delta - \varepsilon_\delta \gamma_3) d_\gamma \vec{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma)} \exp\left[-\frac{\bar{\gamma}_\delta d_\gamma + 2\bar{\gamma}_3 d_\delta}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma} t + j\omega t\right] + \frac{\bar{\gamma}_3 \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma}; \quad (2.35)$$

$$\vec{E}_\gamma = \frac{(\gamma_3 \varepsilon_\delta - \gamma_\delta \varepsilon_3) 2d_\delta \vec{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma)} \exp\left[-\frac{\bar{\gamma}_\delta d_\gamma + 2\bar{\gamma}_3 d_\delta}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma} t + j\omega t\right] + \frac{\bar{\gamma}_\delta \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_\gamma}.$$

Показник степеню e в 2.35 можна представити у вигляді:

$$-\frac{t(\bar{\gamma}_\delta d_\gamma + 2\bar{\gamma}_3 d_\delta)}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma} + i\omega t = -\frac{(\gamma_\delta d_\gamma + 2\gamma_3 d_\delta)t}{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_\gamma}.$$

Таким чином, постійна часу τ дорівнює:

$$\tau = \frac{2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_3}{\gamma_\delta d_3 + 2\gamma_3 d_\delta} . \quad (2.36)$$

У результаті, напруженості поля \vec{E}_δ та \vec{E}_3 в будь-який момент часу, при змінній напрузі, виражаються наступним чином:

$$\vec{E}_{\delta m} = \frac{(\varepsilon_3 \gamma_\delta - \varepsilon_\delta \gamma_3) d_3 \vec{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_3)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3)} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\bar{\gamma}_3 \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3} ; \quad (2.37)$$

$$\vec{E}_{3m} = \frac{(\gamma_3 \varepsilon_\delta - \gamma_\delta \varepsilon_3) 2d_\delta \vec{U}_m}{(2\varepsilon_3 d_\delta + \varepsilon_\delta d_3)(2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3)} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\bar{\gamma}_\delta \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3} . \quad (2.38)$$

Густина струму, що проходить через зернову масу, можна отримати підставивши вираз (2.35) в рівняння (2.10):

$$\vec{J}_3 = \frac{2d_\delta (\varepsilon_3 \gamma_\delta - \varepsilon_\delta \gamma_3)^2 d_3 \vec{U}_m}{(\varepsilon_\delta d_3 + 2\varepsilon_3 d_\delta)^2 (\bar{\gamma}_\delta d_3 + 2\bar{\gamma}_3 d_\delta)} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\bar{\gamma}_\delta \bar{\gamma}_3 \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3} . \quad (2.39)$$

Відносна діелектрична проникність зернової маси, вологістю 12 – 17 %, лежить в діапазоні $\varepsilon_3 \in [3; 10]$, а питома електропровідність – $\gamma_3 \in [2 \cdot 10^{-9}; 4 \cdot 10^{-6}]$ См/м [18]; відповідно для діелектричних пластин вказані характеристики лежать в діапазоні $\varepsilon_\delta \in [2; 8]$, $\gamma_3 \in [10^{-17}; 10^{-10}]$ См/м, при цьому товщина діелектричних пластин $d_\delta \in [0,25; 2]$ мм, а товщина шару зернової маси $d_\delta \in [26; 30]$ мм. При таких значеннях першим доданком у співвідношеннях (2.37) і (2.38) можна знехтувати. Тоді напруженість електричного поля в області зерна і діелектричних пластин може бути знайдено наступним чином:

$$\vec{E}_\delta = \frac{\bar{\gamma}_3 \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3} ; \quad (2.40)$$

$$\vec{E}_3 = \frac{\bar{\gamma}_\delta \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3} , \quad (2.41)$$

а густина повного струму:

$$\vec{J}_{3M} = \frac{\bar{\gamma}_\delta \cdot \bar{\gamma}_3 \vec{U}_m e^{j\omega t}}{2\bar{\gamma}_3 d_\delta + \bar{\gamma}_\delta d_3} . \quad (2.42)$$

Загальний струм, який протікає через зернову масу, що перебуває в електричному полі високої напруги та ізолювана від електродів діелектричними пластинами, утворюється з розрядного струму (2.7) і струму зміщення (2.41):

$$I = \begin{cases} I_{зм}, \text{ якщо } U_{пі} < U_{прі} \\ I_{зм} + \sum_{i=1}^N I_{спі}, \text{ якщо } U_{пі} \geq U_{прі} \end{cases}, \quad (2.43)$$

де N – кількість ланцюгів, що складаються з опорів та ємностей діелектричних пластин, зерна та повітряних включень; $I_z = I_m(j_z) \cdot S$, S – площа електродів.

Рівняння (2.40) та (2.41) дають змогу визначити напругу на електродах обробної камери, при якій відбуваються часткові розряди в зерновій масі. Однак, зважаючи на різноманітність форм зернин, їх випадкове розташування в зоні обробки, а також широкі варіації питомої електропровідності та діелектричної проникності, які можна встановити лише експериментально, ці рівняння дають лише орієнтовну оцінку напруги, при якій виникають розрядні процеси.

2.3. Теоретичні дослідження синтезу озону та оксидів азоту в зерновій масі під дією розрядів та їх вплив на мікроорганізми

Іонізаційні процеси, що виникають у повітряних включеннях зернової маси під впливом електричного поля високої напруженості, мають суттєве значення для знезараження зерна [59]. Оскільки кожне зерно знаходиться в тісному контакті з повітрям, іонізація якого призводить до утворення озону, що ефективно очищує поверхню зерна від мікроорганізмів.

Зернова маса, що знаходиться в електричному полі високої напруженості, як показано в попередньому розділі, може бути розглянута як конденсатор з багатокомпонентним діелектриком (діелектричні пластини, зернова маса), до якого подається висока напруга змінного струму (рис. 2.5).

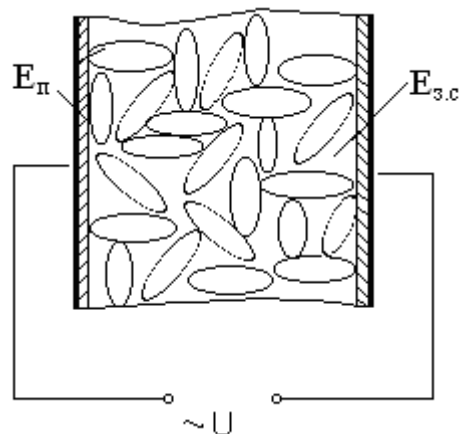


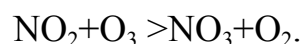
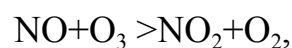
Рис. 2.5. Конденсатор із багатокомпонентним діелектриком (зернова маса, діелектричні пластини)

При подачі напруги на електроди в повітряних включеннях виникає електричне поле. Коли значення напруженості досягає критичної величини $E_{поч}$, відбувається ударна іонізація. Під час іонізаційних процесів у повітряних включеннях протікають електрохімічні реакції, які спричиняють перехід частини кисню (O_2) у його активну форму – озон (O_3) та утворення оксидів азоту. Озон, що утворюється, має знезаражуючий ефект на поверхневу мікрофлору зерна, а оксиди азоту виступають як природні каталізатори.

Озон є одним із найпотужніших природних окислювачів (після фтору). Його окислювальний потенціал складає 2.07 В (для фтору – 2.4 В). Завдяки цьому високому потенціалу озон ефективно діє на зерно, як агент для знезараження. Озон здатний окислювати більшість металів, за винятком золота та платинових металів, а також активно вступає в реакції з різноманітними органічними та ароматичними сполуками. При взаємодії з біологічними об'єктами озон має комплексний вплив. Він змінює проникність мембран та функції мембранних ферментів, взаємодіючи з білками й ліпідами, основними компонентами клітинних мембран, а також інактивацію функціональних груп і вторинних процесів [35]. Озон реагує майже з усіма сполуками, що складають живу клітину.

Вплив озону на шкідливу мікрофлору зернової маси значною мірою залежить від його концентрації. Грибкова флора є найменш чутливою до озону, тоді як бактерії більш чутливі. Чутливість одноклітинних організмів до озону може змінюватися навіть у межах однієї групи. Важливо, що навіть при низьких концентраціях озон значно впливає на репродуктивні функції мікроорганізмів. Повне знищення бактерій можливо при концентрації $3 \cdot 10^8$ молекул O_3 на клітину (рис. 2.6).

Для ефективної знезаражуючої обробки зернової маси важливими є наявність оксидів азоту, атомарного азоту та вологи в повітрі. Озон, як сильний окислювач, здатний доокислювати оксиди азоту:



Він, у свою чергу, є природним каталізатором реакцій утворення озону. Крім того, бактерицидний ефект значно посилюється в 10 – 100 разів, якщо в повітрі присутня вода в кількості 10 – 50 г/м³ [43, 105].

З присутністю вищезгаданих факторів процес знезараження зерна стає значно ефективнішим.

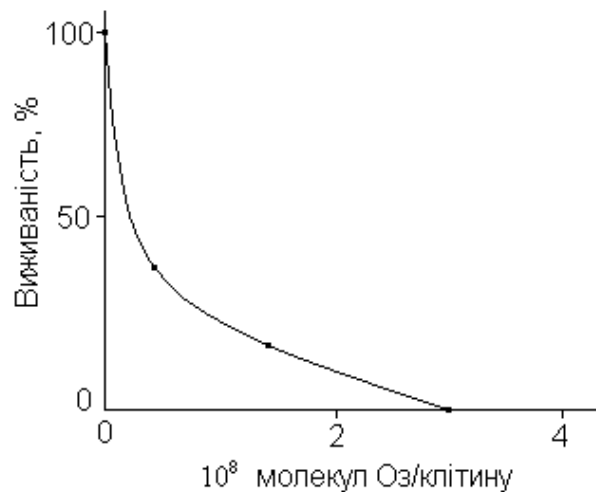
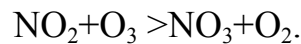
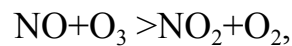


Рис. 2.6. Вплив концентрації озону на здатність до виживання бактерій

Ключовим фактором для ефективної знезаражуючої обробки зернової маси є присутність в повітрі оксидів азоту, атомарного азоту та вологи. Озон, будучи потужним окислювачем, спричиняє доокислення оксидів азоту:



В свою чергу, він є природним каталізатором процесів утворення озону. Крім того, бактерицидний ефект посилюється в 10 – 100 разів при наявності води в повітрі в кількості 10 – 50 г/м³.

За умови наявності зазначених факторів знезаражуюча обробка зерна стає значно ефективнішою.

З аналізу вищезазначених даних можна зробити висновок, що ефективність знезаражуючої обробки зерна в електричному полі високої напруженості змінного струму залежить від концентрації озону та оксидів азоту, вологості зерна і тривалості обробки.

$$EZO = f(K, K_a, \tau, W), \quad (2.21)$$

де K – концентрація озону;

K_a – концентрація оксидів азоту;

τ – час знаходження зернової маси під дією електричного поля;

W – вологість зерна.

Окрім зазначених факторів, на інтенсивність іонізації також впливають геометричні характеристики зернового матеріалу. Зернини різних культур мають різні форми (наприклад, соя — кругла, овес — витягнута з тонкими кінцями).

При обробці різних видів зернового матеріалу змінюється кількість і розміри повітряних включень, у яких відбуваються іонізаційні процеси. Іонізаційні процеси будуть також відрізнятися для різних сортів однієї культури. Дослідження різних сортів сої показали, що зернини різних сортів мають різну форму і шорсткість поверхні, що також впливає на інтенсивність іонізаційних процесів.

Таким чином, рівень концентрації озону та оксидів азоту визначається інтенсивністю іонізаційних процесів, які, в свою чергу, залежать від напруги, що подається на електроди обробної камери, товщини діелектричних пластин, що відокремлюють зернову масу від високовольтних електродів, питомої електропровідності зернової суміші та геометричних характеристик зернин:

$$K_o = f(U, h_n, \gamma_{zc}, \Phi_z), \quad (2.22)$$

де Φ_z – геометрична форма зернин;

h_n – товщина діелектричних пластин;

γ_{zc} – питома електропровідність зернової суміші.

Під час знезаражуючої обробки в електричному полі високої напруженості змінного струму важливо визначити напругу початкової іонізації. Від цього значення залежатимуть параметри обробки.

Напруга початкової іонізації буде залежати від відстані між електродами в обробній камері, товщини діелектричних пластин, вологості зерна, форми зернин та відносної густини повітря:

$$U_{поч} = f(H, h_{пл}, W, \Phi_z, \delta), \quad (2.23)$$

де H – товщина шару зернової маси;

δ – відносна густина повітря.

При подальшому збільшенні напруги, поданої на електроди обробної камери, вище за $U_{поч}$, іонізаційні процеси стають більш стабільними (активними) – це напруга стійкої іонізації $U_{ст}$.

Отже, процес знезаражуючої обробки проходить у такій послідовності: на електроди обробної камери подається напруга, внаслідок чого зернова маса опиняється в електричному полі високої напруженості змінного струму. При певній початковій напрузі в повітряних міжзернових включеннях виникають часткові розряди. Під їх впливом відбуваються іонізаційні процеси, що супроводжуються електрохімічними реакціями, в результаті яких утворюються озон і оксиди азоту, що мають сильну знезаражуючу дію та знищують шкідливу мікрофлору на поверхні зерна.

Інтенсивність іонізаційних процесів є ключовим фактором, який визначає концентрацію озону під час знезаражуючої обробки зерна в електричному полі високої напруженості змінного струму. На сьогоднішній день практично немає даних про залежність іонізаційних процесів від різних властивостей зерна та навколишнього середовища, що обумовлює необхідність проведення експериментальних досліджень у цій галузі.

2.4. Висновки до розділу 2

Зернова маса як суміш зерен і повітря піддається дії електричного поля, що викликає електричні розряди у повітряних проміжках. При підвищенні напруженості електричного поля відбувається перехід від лінійної залежності густини струму до експоненціального зростання, де виникає ударна іонізація. Під впливом поля заряджені частинки рухаються й осідають на поверхні зернин. При змінній напрузі наступні розряди відбуваються при менших значеннях напруги. Розрядні процеси супроводжуються утворенням озону та оксидів азоту, що мають знезаражуючий ефект на мікрофлору зерна. Озон як потужний окислювач змінює проникність клітинних мембран мікроорганізмів. Ефективність обробки залежить від концентрації озону, вологості зерна, тривалості обробки та геометрії зернового матеріалу. Початкова напруга іонізації визначається відстанню між електродами, товщиною діелектричних пластин та іншими параметрами системи. Таким чином, процес знезаражуючої обробки ґрунтується на використанні часткових розрядів для генерації озону й оксидів азоту, які знищують шкідливі мікроорганізми на поверхні зерна.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗЕРНОВІЙ МАСІ ПІД ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ

3.1. Дослідження електрофізичних процесів в зерновій масі

За проведеним літературним аналізом встановлено, що дослідження електрофізичних процесів, які проходять в зерновій масі під впливом електричного поля, більшою мірою були спрямовані на покращення посівних якостей насіння і проводились з використанням джерела живлення високої напруги постійного струму [11]. Використання потужних електричних полів для дезінфекції зерна потребує подальших досліджень. Результативність такого впливу може зрости за умови застосування джерел живлення змінного струму високої напруги, що сприяє посиленню розрядних явищ і, відповідно, підвищенню концентрації озону. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні обладнання та методики для вивчення електрофізичних явищ у зерновій масі під впливом сильного змінного електричного поля.

Зернова маса є неоднорідною сумішшю, яка на 30–50 % складається з повітряних порожнин. При дії електричного поля між пластинчастими електродами в зерновій масі виникає поляризація: по обидва боки повітряних включень накопичуються заряди протилежних знаків. Коли напруженість електричного поля досягає критичного значення (що залежить від фізичних властивостей маси), у цих повітряних включеннях з'являються розрядні явища. Спершу розряди виникають у тих зонах, де електричне поле розподілене найнерівномірніше. Із зростанням прикладеної напруги кількість таких розрядів збільшується, причому імпульси в нових включеннях є сильнішими. Крім того, розряди в раніше активних зонах стають інтенсивнішими.

У конструкції лабораторної установки потрібно було забезпечити можливість фіксації розрядних явищ, що виникають у зерновій масі під впливом електричного поля змінного струму високої напруги. Відомі способи

реєстрації таких процесів у діелектричних матеріалах з повітряними включеннями відзначаються високою чутливістю до зовнішніх завад і є складними у практичному застосуванні.

Для здійснення експериментальних досліджень до електричного кола електродної системи лабораторної установки було підключено активний опір, на якому за допомогою осцилографа реєструвалися амплітуда та частота імпульсів струму. На рис. 3.1 подано функціональну схему експериментальної установки.

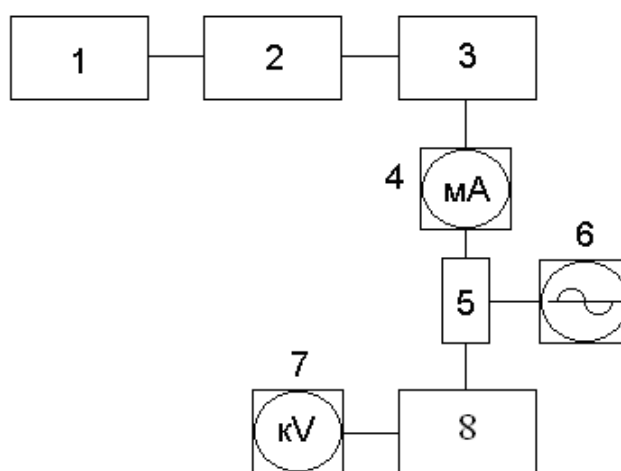


Рис. 3.1 Функціональна схема дослідної установки: 1 – джерело живлення; 2 – автотрансформатор; 3 – трансформатор високовольтний; 4 – мікроамперметр; 5 – активний опір; 6 – осцилограф; 7 – кіловольтметр. 8 – камера обробки

Експериментальна установка включає автотрансформатор для регулювання напруги, високовольтний трансформатор та камеру обробки, куди засипається зернова маса. Для вимірювання струму, що проходить через зразок, застосовувався магнітоелектричний мікроамперметр. Контроль прикладеної напруги здійснювався за допомогою кіловольтметра С96. Для реєстрації імпульсів струму використовувався осцилограф “Tektronix TDS 1012”. Принципова електрична схема установки наведена на рис. 3.2, зовнішній вигляд — на рис. 3.3.

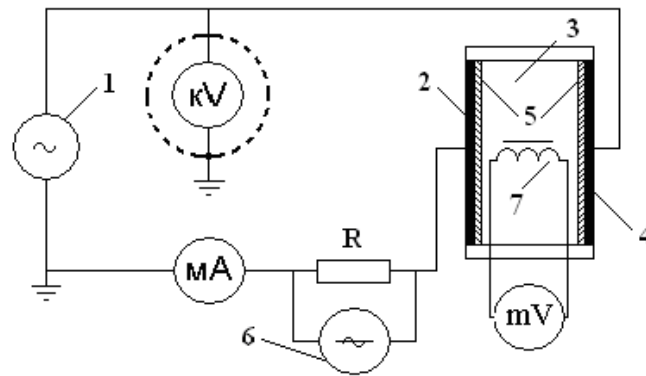


Рис. 3.2 Принципова електрична схема дослідної установки: 1 – джерело високої напруги змінного струму; 2,4 – плоско-паралельні пластинчасті електроди; 3 – дослідна камера для обробки зернового матеріалу; 5 – діелектричні пластини; 6 – осцилограф, 7 – індуктивний датчик

Принцип роботи установки полягає в наступному. До дослідної камери (поз. 3) засипається зернова маса. Після увімкнення автотрансформатора автоматично активується високовольтний трансформатор, який подає змінну високу напругу на електроди (поз. 2 і 4). Оброблюваний матеріал ізолюваний від електродів діелектричними пластинами (поз. 5) і перебуває в електричному полі. При досягненні певної напруженості поля в об'ємі зернової маси починаються електричні розряди. Внаслідок цього на опорі з'являються високочастотні імпульси струму, які реєструються осцилографом. Частота проходження цих імпульсів виступає показником інтенсивності розрядних процесів у повітряних включеннях зерна. Напруга, при якій розпочинається первинна та стійка іонізація, суттєво залежить від фізичних властивостей зернової маси та повітря.



Рис. 3.3 Зовнішній вигляд дослідної установки

Враховуючи багатогранність дії різних факторів на електрофізичні процеси, що проходять в зерновій масі під дією електричного поля високої напруженості змінного струму, дослідження виконувались шляхом проведення окремих послідовних груп експериментальних досліджень, які включали:

- дослідження впливу діелектричних пластин на інтенсивність іонізаційних процесів у зерновій масі;
- дослідження інтенсивності іонізаційних процесів при обробці зернової маси різних культур;
- дослідження впливу вологості зернової маси на початкову напруженість іонізаційних процесів;
- вплив напруженості електричного поля на інтенсивність іонізаційних процесів у зерновій масі.

Конструкція установки спроектована таким чином, що оброблювана зернова маса ізольована від електродів діелектричними пластинами. Як показали попередні теоретичні дослідження, вибір матеріалу та товщини пластин суттєво впливає на перебіг електрофізичних процесів у зерновій масі. З метою дослідження було виготовлено діелектричні пластини з семи різних матеріалів, придатних до використання в харчовій промисловості й безпечних для здоров'я. Пластини розрізнялися як за складом, так і за товщиною. У якості дослідного матеріалу використовували зерно ячменю (як основний об'єкт) та пшениці (як контрольний зразок для порівняльного аналізу результатів).

Напруга на електродах при дослідах змінювалась автотрансформатором у межах від 0 кВ до 16 кВ і контролювалась кіловольтметром С 96.

У ході досліджень вивчались струм, що проходить через зернову масу, та характер розрядних процесів. Вимірювання струму здійснювалося мікроамперметром магнітоелектричної системи типу М265М. Для фіксації розрядних процесів використовувався індуктивний датчик, закріплений на камері обробки, виходи якого були під'єднані до універсального вольтметра типу В7-26. Значення напруги, зафіксоване на індуктивному датчику, умовно

приймалося як показник відносної інтенсивності іонізації — за аналогією з методами оцінки в ізоляційних матеріалах.

У попередньому розділі було зазначено, що інтенсивність іонізаційних процесів у зерновій масі значною мірою залежить від виду сільськогосподарської культури, оскільки змінюються кількість і розміри повітряних включень, а також геометрична форма зернин. Дослідження у цьому напрямі проводилися на розробленій експериментальній установці з використанням наведеного раніше обладнання та діелектричних пластин із поліетилену. В якості об'єктів дослідження було обрано чотири культури з різною формою зерен. Зернову масу кожної культури по черзі засипали до камери обробки, після чого поступово підвищували напругу на електродах і реєстрували показання вольтметра та амперметра.

Крім перерахованих вище факторів на інтенсивність іонізаційних процесів впливають фізичні характеристики зерна: вологість, температура. Так при зміні температури зерна від 10 до 25 °С питома електропровідність зернової маси ячменю збільшується в 5...6 разів, при зміні вологості від 12,6 до 24 % збільшується до 6000 разів [12]. Тому далі слід більш детально дослідити вплив вологості на інтенсивність іонізаційних процесів.

Зразки зернової маси з різною вологістю готували штучно. Однакові порції зерна або зволожували визначеною кількістю дистильованої води та витримували у закритій тарі протягом трьох діб для рівномірного розподілу вологи, або підсушували протягом різного часу.

Експериментальні дослідження здійснювалися на лабораторній установці, до електричного кола якої було включено активний опір (R), виводи якого підключали до першого каналу осцилографа “Tektronix TDS 1012”. При протіканні струмів розряду та зміщення на опорі виникали втрати напруги, які реєструвались на екрані осцилографа. Другий канал використовувався для підключення щупа, що вимірював напругу в колі.

Таким чином, поступово підвищуючи напругу, за допомогою осцилографа фіксували розрядні процеси в зерновій масі, їхню частоту, а також напругу, прикладену до електродів.

3.2. Дослідження концентрації озону в зерновій масі при різних режимах обробки

Результатом розрядних процесів у зерновій масі є хімічні реакції, що призводять до утворення озону та його подальшого розпаду. Для синтезу молекули озону необхідно наявність вільного атома, який виникає в результаті взаємодії молекули кисню з вільним електроном.



Реакція дисоціації молекули кисню відбувається дуже швидко. Постійна часу цього процесу є дуже малою і складає лише кілька наносекунд. Молекула озону утворюється внаслідок приєднання вільного атома до молекули кисню, однак для цієї реакції необхідна присутність третьої частинки: молекула, іон, електрон, атом в нейтральному чи збудженому стані. Формування молекули озону потребує часу до 10 мкс.



Крім того в наслідок хімічних реакцій частинки газу постійно рухаються, що призводить до розпаду молекули озону:



Ця реакція залежить від температури і протікає тим швидше, чим вища температура. Кількість озону в озono-повітряній суміші визначається перевищенням інтенсивності його утворення над швидкістю розпаду.

Отже, в зерновій масі, що перебуває під впливом електричного поля високої напруги, утворюється озон, концентрація якого залежить від інтенсивності іонізаційних процесів, що регулюються режимними параметрами.

Визначення залежностей між властивостями зернової маси, режимними параметрами та концентрацією озону дозволить встановити оптимальні режими для ефективної знезаражувальної обробки. Для цього були проведені експериментальні дослідження.

У процесі знезаражувальної обробки зерна важливу роль відіграють матеріал і товщина діелектричних пластин, що відокремлюють зернову масу від високовольтних електродів і запобігають виникненню струму провідності, який є небажаним при такому виді обробки. З широкого спектра діелектричних матеріалів, що виробляються промисловістю, потрібно було обрати найбільш ефективний за фізичними характеристиками, технологічними параметрами та вартістю. Попередні дослідження показали, що одним з таких матеріалів є поліетилен марки М, який має хороші механічні властивості та високі діелектричні характеристики.

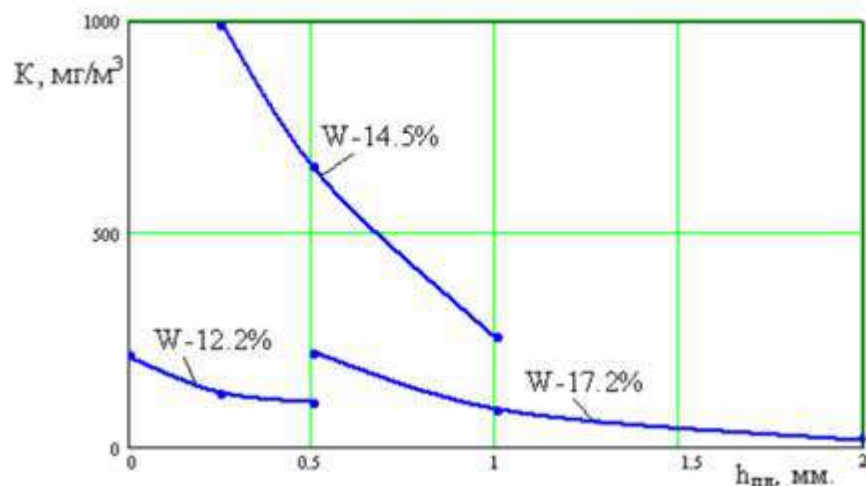


Рис. 3.4. Залежність концентрації озону від товщини діелектричних пластин в зернової масі різної вологості

Опір R_1 визначає величину струму провідності (I_p). Опір повітряного включення є нелінійним і залежить від напруженості на ньому (U_c), змінюючись під час іонізаційних процесів. Коли напруга на повітряному проміжку менша за пробивну, його опір значно більший за опір насіння

($R3 \gg R1$). Таким чином, насінневу масу можна уявити як велику кількість ланцюгів з $R2i$, Ci і $R4i$.

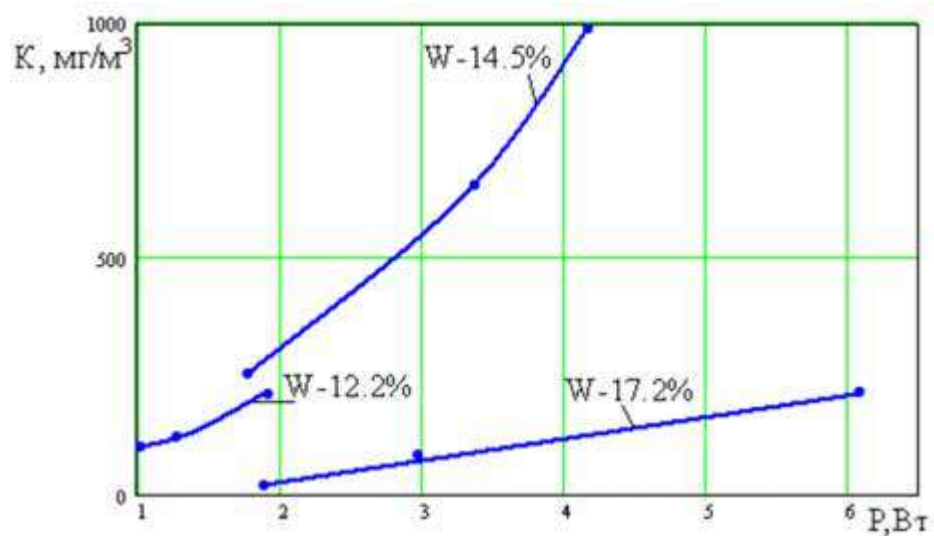


Рис. 3.5. Залежність концентрації озону від потужності в зерновій масі різної вологості

При обробці сухої зернової маси з вологістю до 13% концентрація озону зменшується зі збільшенням товщини діелектричних пластин. Найвища концентрація спостерігається при обробці без пластин, при цьому струм провідності залишається на низькому рівні. Тому для сухої зернової маси найефективніше застосовувати обробку без діелектричних пластин.

Так, при використанні діелектричних пластин товщиною 1 мм для досягнення дози $2940 \text{ мг} \cdot \text{хв} / \text{м}^3$ зернову масу ячменю потрібно обробляти протягом 11,7 хвилини при потужності 1,76 Вт. За таких режимних умов на обробку 1 м^3 зернової маси ячменю потрібно витратити $1,97 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ електроенергії.

Встановлення діелектричних пластин товщиною 0,25 мм у камері обробки дозволяє збільшити концентрацію озону в зерновій масі ячменю до $988 \text{ мг} / \text{м}^3$. При такій концентрації для досягнення потрібної дози час обробки становить 3 хвилини. Однак експериментальні дослідження показали, що максимальна ефективність обробки досягається при мінімальному часі обробки в 5 хв. Тобто при потужності 4,16 Вт і тривалості обробки 5 хв для досягнення ефективної

обробки ячменю за допомогою пластин товщиною 0,25 мм необхідно витратити 1,92 кВт·год/м³ електроенергії.

При обробці ячменю з діелектричними пластинами товщиною 0,5 мм доза забезпечується при експозиції 4,58 хв. З урахуванням потужності установки, яка при таких пластинах становить 3,36 Вт, та встановленого мінімального часу обробки 5 хв, питомі енергетичні витрати складають 1,55 кВт·год/м³. Таким чином, використання діелектричних пластин товщиною 0,5 мм дозволяє забезпечити ефективну дозу обробки при мінімальних енергетичних затратах.

З наведеного видно, що найбільш доцільним є проведення знезаражувальної обробки зернової маси з кондиційною вологістю 14–14,5 % з використанням поліетиленових діелектричних пластин товщиною 0,5 мм. Для обробки зерна з некондиційною вологістю, при використанні пластин іншої товщини, необхідно підвищувати режимні параметри, що призведе до збільшення питомої потужності і відповідно до підвищення енергетичних витрат.

Відомо, що концентрації оксидів азоту до 0,15 % є безпечними для людини і навіть використовуються в медицині. Обробка ран оксидами азоту сприяє їх швидшому загоєнню та знищенню мікрофлори, що запобігає виникненню ускладнень. Згідно з наведеними даними, при обробці зернової маси запропонованим методом з напруженістю поля 5 кВ/см концентрація оксидів азоту становить 0,014 %.

Як зазначалося раніше, серед усіх властивостей зернової маси, які впливають на режимні параметри знезаражувальної обробки, найбільший вплив має її вологість. Вона визначає діелектричні властивості зернової маси, що суттєво впливає на розрядні процеси під дією електричного поля високої напруженості, а отже й на концентрацію озону. Важливо також зазначити, що регулювання вологості зернової маси є тривалим, трудомістким та енерговитратним процесом. Складність ще й у тому, що зміна умов навколишнього середовища, у яких зберігається зерно, також призводить до зміни його вологості. Отже, режимні параметри для ефективної

зnezаражувальної обробки повинні визначатись для кожної партії зерна залежно від його вологості.

Для дослідження впливу вологості на концентрацію озону використовували ячмінь сорту “Етикет” з вологістю у межах з 12.2 до 17.2 %. При дослідженнях використовувались діелектричні пластини з поліетилену товщиною 0,5 мм, відстань між електродами становила 3 см, висота суміші ячменю 6 см. Напруга на електродах становила 16 кВ [13].

Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що при обробці зернової маси ячменю з вологістю 14–14,5 % концентрація озону перевищує 600 мг/м³ при напрузі 16 кВ і відстані між електродами 3 см. Питомі витрати електроенергії при обробці ячменю з вологістю 14,5 % становлять 1,5–1,6 кВт·год/м³. Як зазначено в літературних джерелах, концентрація 350 мг/м³ практично стерилізує зернову масу від усіх видів мікроорганізмів. Отже, можна зробити висновок, що запропонований метод зnezараження зернової маси в електричному полі високої напруженості змінного струму є ефективним засобом боротьби з поверхневою мікрофлорою.

3.3. Дослідження впливу зnezаражуючої обробки на життєдіяльність мікрофлори зерна та його посівні якості

Висока якість насіння є одним з основних факторів, що забезпечують отримання високих та якісних врожаїв сільськогосподарських культур. Насіння сільськогосподарських культур містить білки, вуглеводи та мінеральні речовини, що робить його хорошим живильним середовищем для патогенних мікроорганізмів. Насіння може бути джерелом багатьох хвороб, які погіршують якість і знижують врожайність.

Внаслідок посіву зараженого насіння хвороби передаються на рослини в період їхнього росту, що спричиняє зараження нового врожаю.

Дослідження ефективності зnezаражувальної обробки проводилися в двох напрямках: вивчення впливу на мікроорганізми, які спричиняють псування

насіння під час зберігання, та вплив на хвороботворні мікроорганізми, які проявляються при висіві насіння.

Серед мікроорганізмів, що мають негативний вплив на якість насіння під час зберігання, плісняві гриби є одними з найпотенційно небезпечних та стійких до різних методів обробки. У розділі 1.2 цієї роботи представлені результати досліджень життєздатності спор пліснявих грибів, які були вирощені на зерні пшениці та ячменю з вологістю 25%. Втрата життєздатності спор на рівні 99,8–99,9 % була досягнута при концентрації озону 350 мг/м³ та експозиції 2 хвилини і більше. При концентрації 150 мг/м³ і тій же експозиції цей показник становив 33,8–76,5 %. Однак варто зазначити, що в цих дослідженнях озон подавали до зернової маси через трубопровід, і концентрація вимірювалася на виході озонатора, а не безпосередньо в масі зерна. Оскільки озон має властивість швидко розпадатися, фактична концентрація, якою оброблялася зернова маса, була значно меншою. Крім того, озон активно взаємодіє з поверхневими шарами та погано проникає в нижні шари зернової маси, що робить обробку нерівномірною. Тому виникла необхідність проведення додаткових досліджень на спеціально розробленій установці для вимірювання концентрації озону безпосередньо в зерновій масі.

Шкідливий вплив хвороб насіння, що викликані паразитичними організмами, проявляється по-різному, залежно від патогенності організму, глибини його проникнення та залягання в насінні, а також від умов навколишнього середовища.

Негативні наслідки включають пошкодження тканин насіння, що веде до зниження його схожості, ослаблення проростків, випадку сходів та порідшання посівів. Одним із найбільш поширених представників паразитичних мікроорганізмів є гриби роду *Fusarium*, деякі види яких були виявлені на досліджуваному насінні.

Хоча серед цього роду гриби деяких видів адаптувались до розвитку на вегетативних рослинах, тобто здобули паразитичні властивості, інші види слабо

розвиваються на рослинах під час вегетації, але виявляють велику активність під час зберігання насіння, коли життєві процеси в насінні сповільнюються.

Основними чинниками режиму обробки, що впливають на життєздатність спор твердої сажки, є концентрація озону та тривалість експозиції. Тому доцільно виразити дозу обробки D як вплив на зернову масу озоном з певною концентрацією протягом визначеного часу.

$$D = K \cdot t, \quad (3.4)$$

де D – доза обробки, мг·хв./м³;

K – концентрація озону, мг/м³;

t – час експозиції, хв.

Аналітична форма залежності $N=f(D)$, отримана за допомогою програмного забезпечення на ПЕОМ, подана у вигляді формули:

$$N = \frac{1}{0,01 + 0,00035 \cdot D^{0,7}}, \quad (3.5)$$

де 0,1, 0.00035, 0,7 – коефіцієнти для зернової маси пшениці.

Аналіз отриманих даних показав, що ефективна доза обробки (знезараження 90 % спор) досягається при значеннях, що перевищують 2940 мг·хв./м³.

Знезаражувальна обробка може бути застосована до всієї зернової маси, що надходить до господарства. У подальшому процесі вона поділяється на насіннєвий матеріал, продовольче та фуражне зерно. Для фуражного зерна достатньо знешкодити шкідливу мікрофлору, що підвищує його енергетичну цінність, а для насіннєвого матеріалу та частини продовольчого зерна (наприклад, для виготовлення солоду) важливим є вплив на енергію проростання та схожість. У зв'язку з цим були проведені дослідження в яких після визначення впливу на шкідливу мікрофлору досліджувались посівні якості [14]. Результати досліджень наведені у таблиці 3.1.

За результатами лабораторних досліджень енергія проростання і схожість покращилась у всіх оброблених варіантах. Це пов'язано із зменшенням кількості шкідливих мікроорганізмів на поверхні зернин, що можуть пригнічувати процеси росту.

Таблиця 3.1

Режими обробки зернової маси пшениці сорту Подолянка в електричному полі високої напруженості

Варіант		Енергія проростання	Схожість
Контроль		89	93
16кВ 5 хв	Без перемішування	94	96
20кВ 5 хв		92	96
22кВ 5 хв		94	98
16кВ 5 хв	З перемішуванням	95	98
20кВ 5 хв		92	94
22кВ 5 хв		93	97

Отже, внаслідок знезаражуючої обробки в електричному полі високої напруженості змінного струму на поверхні зерна відбувається значне зменшення кількості шкідливих мікроорганізмів. Це, в свою чергу, призводить до покращення його посівних та хлібопекарських якостей, а також підвищення харчової цінності.

3.4. Висновки до розділу 3

Експериментальні дослідження електрофізичних процесів у зернової масі під впливом електричного поля високої напруженості встановили оптимальні параметри знезаражувальної обробки зерна. Розроблена установка дозволила фіксувати розрядні явища та вимірювати концентрацію озону безпосередньо в зернової масі. Виявлено, що для зерна з вологістю 14-14,5% найефективнішим є застосування поліетиленових діелектричних пластин товщиною 0,5 мм, що забезпечує концентрацію озону понад 600 мг/м³ при мінімальних енергетичних

затратах 1,55 кВт·год/м³. Для сухого зерна (вологість до 13%) доцільно проводити обробку без діелектричних пластин. Ефективна доза знезараження досягається при значеннях понад 2940 мг·хв/м³, що знищує 90% спор твердої сажки. Знезаражувальна обробка не лише знищує шкідливу мікрофлору, але й підвищує посівні якості насіння – енергію проростання до 94-95% та схожість до 96-98%. Запропонований метод є безпечним (концентрація оксидів азоту 0,014%) та ефективним засобом боротьби з поверхневою мікрофлорою зерна.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЗЕРНОВОЇ МАСИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ SCADA-СИСТЕМИ

4.1. Розробка способу та технологічного процесу знезаражуючої обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості при зберіганні

Успішне зберігання зернової маси у складах і елеваторах, а також при тимчасовому зберіганні на токах і майданчиках з найменшими втратами ваги і якості можливе лише при правильному вирішенні всіх технологічних і оперативних питань.

В Україні найбільш поширеним є спосіб зберігання зернової маси в сухому стані. Однак, у період масового збирання врожаю кількість зерна, що надходить до зерноочисних і сушильних комплексів, значно перевищує їх пропускну здатність. Недостатність сушильних потужностей у піковий період змушує виробників накопичувати зернову масу на площадках тимчасового зберігання, що призводить до найбільших втрат зібраного врожаю.

Вологість щойно зібраної зернової маси досить висока. За високої вологості та сприятливих погодних умов зерно стає ідеальним субстратом для розвитку мікроорганізмів. Крім того, у повітряних проміжках свіжозібраного зерна міститься багато кисню, що також стимулює розвиток шкідливої мікрофлори.

Зберігання вологого зерна в насипах перед сушінням значно зменшує його схожість навіть за короткий термін, а при надмірній вологості воно може майже повністю втратити життєздатність за три доби.

У сільському господарстві з метою збереження зернової маси на цьому етапі застосовують перемішування, вентилування та просушування сонячним промінням. Однак ці заходи недостатньо ефективні або потребують значних матеріальних витрат.

Запропонований нами спосіб передбачає обробку зернової маси в електричному полі високої напруженості змінного струму без застосування окремого генератора озону та додаткового обладнання для подачі озону. Генерування озону здійснюється безпосередньо самою продукцією рівномірно без вентилявання.

Технологічний процес обробки починається з визначення вологості зернової маси, від якої залежать режимні параметри. Після налаштування установки (час обробки та напруженість електричного поля) зернова маса завантажується в камеру обробки. При вмиканні установки живлення подається на високовольтні електроди, розміщені в камері по чергово із зануленими. Вся зернова маса піддається впливу електричного поля високої напруженості змінного струму.

У повітряних включеннях зернової маси під дією електричного поля високої напруженості виникають часткові розряди, що призводять до іонізаційних процесів. Ці процеси сприяють перетворенню молекул кисню на озон. Також утворюються оксиди азоту, які підсилюють дію озону. В результаті зернова маса рівномірно обробляється цими речовинами протягом заданого часу. Після закінчення обробки реле часу вимикає живлення, відкривається засувка, і зернова маса висипається.

Розроблений спосіб обробки зернової маси при зберіганні має ряд суттєвих переваг по відношенню до існуючих:

- екологічна чистота;
- відсутність впливу на біологічну структуру зерна;
- можливість використовувати оброблене зерно для будь-яких цілей;
- низькі витрати електроенергії;
- низька собівартість обробки у порівнянні з хімічними засобами, що застосовуються для знезаражуючої обробки;
- відсутність перехідних елементів між озонатором та продукцією.

Важливим питанням впровадження способу у виробництві є пристосування його до технологічного процесу. Розроблена нами схема

технологічної лінії знезаражуючої обробки зерна в електричному полі високої напруженості наведена на рис. 4.1.

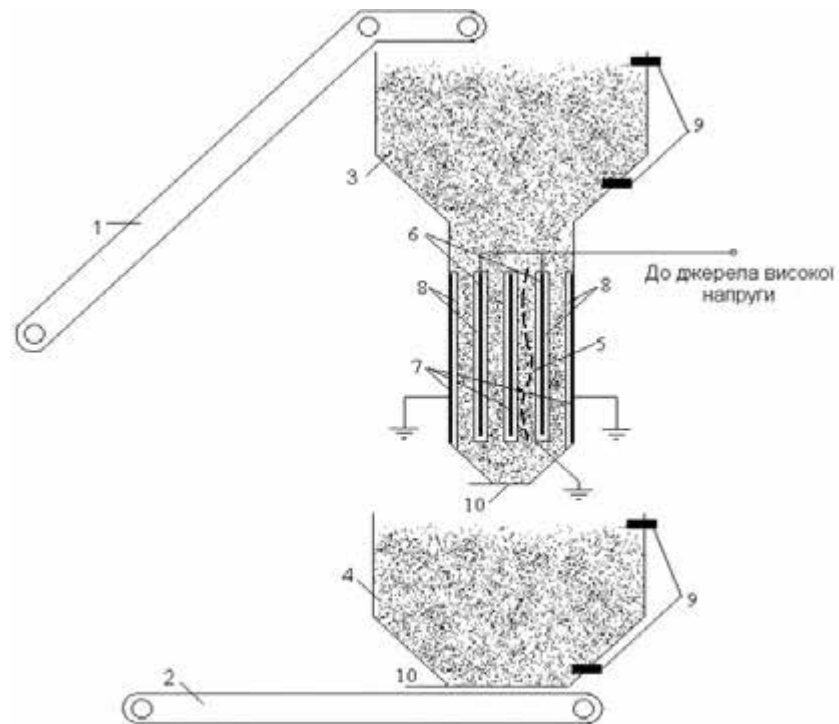


Рис. 4.1 Схема технологічної лінії для знезаражуючої обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості: 1 – завантажувальний транспортер; 2 – вивантажувальний транспортер; 3 – завантажувальний бункер; 4 – вивантажувальний бункер; 5 – камера обробки; 6 і 7 – плоско паралельні електроди; 8 – діелектричні пластини; 9 – датчики рівня; 10 – електромеханічні засувки

Знезараження зернової маси здійснюється за наступним принципом роботи. Після подачі електроживлення активується завантажувальний транспортер 1, який транспортує зерно із зернотоку або складу до завантажувального бункера 3. Звідти зерно під дією сили тяжіння надходить у камеру обробки. Рівень зерна в завантажувальному бункері контролюється рівнемірами 9, сигнал з яких надходить до електронного контролера. При досягненні необхідного рівня, контролер подає сигнал на включення джерела високої напруги. Далі, відповідно до встановленого режиму обробки,

контролером задається затримка перед активацією приводу заслінки, відрегульованої на певну ступінь відкриття 10. Заслінка налаштована так, щоб зерно самопливом виходило з камери обробки у приймальний бункер 4.

У разі заповнення приймального бункера або зниження рівня зерна в завантажувальному резервуарі, відповідні рівнеміри подають сигнал на запуск необхідного транспортера. Функціональна схема технологічної установки для обробки зернової маси в умовах дії сильного електричного поля зображена на рис. 4.2.

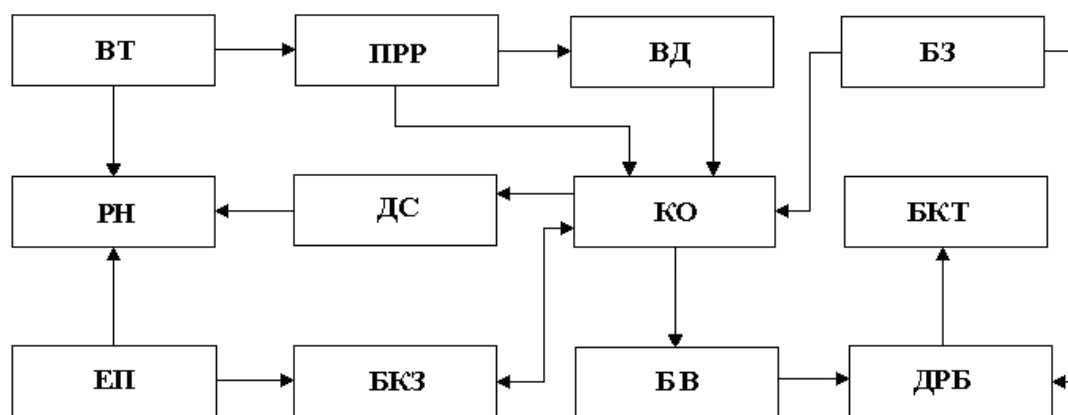


Рис. 4.2 Функціональна схема технологічної лінії для обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості: ЕП – електронний програматор; РН – регулятор напруги; ВТ – високовольтний трансформатор; ПРР – перемикач режиму роботи; ВД – випрямляч на діодах; ДС – датчик струму; КО – камера обробки; БКЗ – блок керування засувкою; БКТ – блок керування транспортерами; ДРБ – датчики рівня бункерів, БЗ – бункер завантажувальний, БВ – бункер вивантажувальний

Також було розроблено блок-схему алгоритму роботи технологічної лінії в автоматичному режимі, яка наведена на рис. 4.3.

Розроблений спосіб знезаражуючої обробки зернової маси передбачає вплив на шкідливу мікрофлору озonom, який утворюється під дією електричного поля високої напруженості. Для реалізації цієї технології було розроблено спеціальну установку, яка здатна забезпечити необхідні параметри обробки.

Технічні засоби, що використовуються для обробки зернової маси з використанням електричного поля високої напруженості, мають відповідати наступним вимогам:

- забезпечення напруженості поля не менше 5,5 кВ/см з можливістю регулювання;
- мінімальні габарити;
- наявність засобів захисту від перевантаження;
- безпечність для обслуговуючого персоналу.

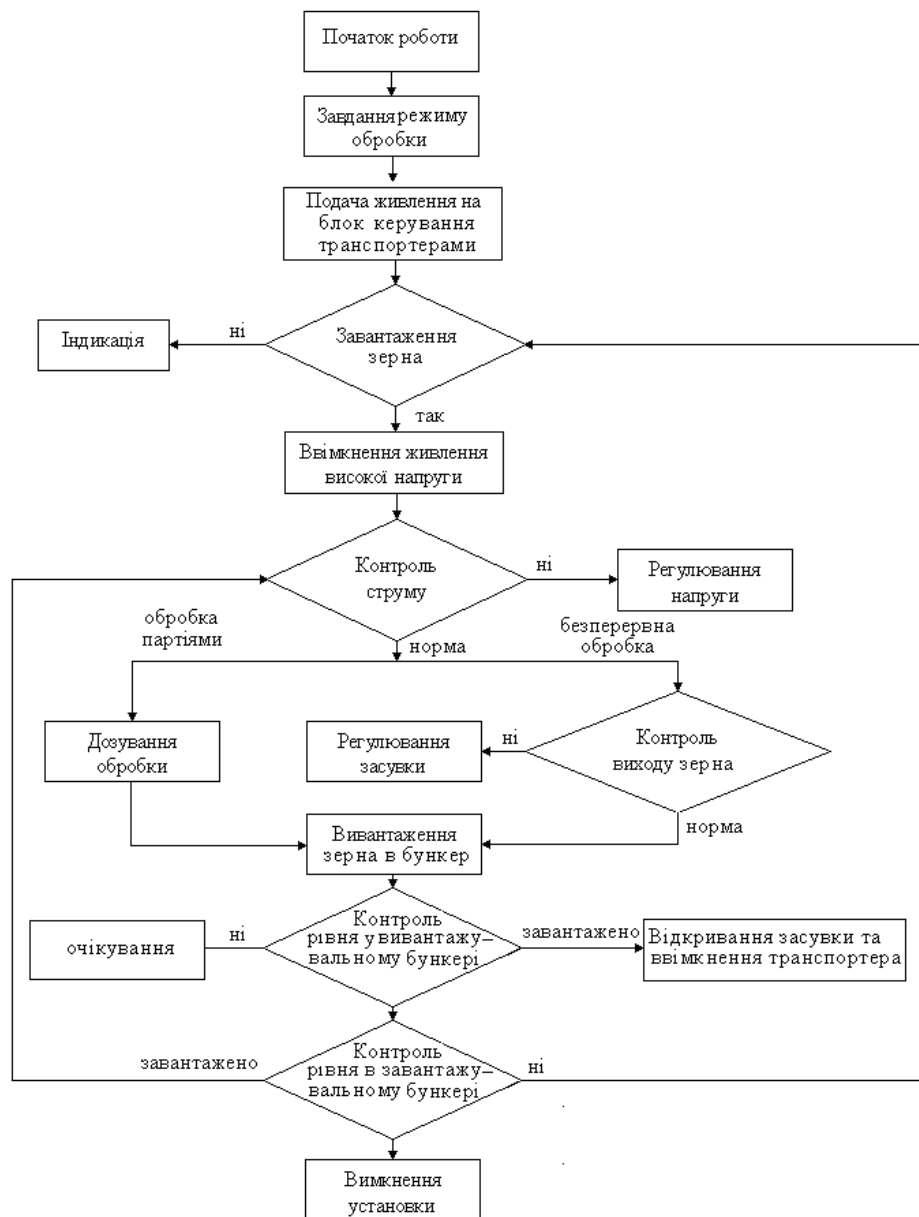


Рис. 4.3 Блок-схема алгоритму роботи технологічної лінії для знезаражуючої обробки зернової маси

Конструкція установки розроблена таким чином, що зовнішні електроди заземлені і виконують роль кожуха, завдяки чому знижується матеріалоемність конструкції. Високовольтні електроди розміщені всередині камери обробки, яка, як і засувка та завантажувальний бункер, виготовлена з діелектричного матеріалу.

Для забезпечення автоматизації процесу обробки зернової маси та підвищення ефективності роботи установки було інтегровано SCADA-систему (Supervisory Control And Data Acquisition). Ця система дозволяє здійснювати моніторинг, збір і обробку даних, віддалене керування технологічним процесом і його візуалізацію.

4.2. Розробка та дослідження експериментальної установки

Розроблений метод дезінфекції зернової маси базується на впливі озону, що утворюється під дією електричного поля високої напруги, на патогенну мікрофлору. Досягнення концентрації озону, достатньої для ефективного знезараження безпосередньо в зерновому середовищі, стає можливим за умов наявності відповідного технічного забезпечення.

Технічні засоби, що використовуються для обробки зернової маси з використанням електричного поля високої напруженості повинні відповідати наступним вимогам: забезпечувати напруженість поля не менше 5,5 кВ/см з можливістю його регулювання, мати мінімальні габарити, засоби захисту від перевантаження та безпечність для обслуговуючого персоналу [15].

Конструкція установки розроблена таким чином, що зовнішні електроди виступають заземленим екраном, виконуючи функцію кожуха. Це дозволяє обійтись без додаткового захисного корпусу, зменшити витрати матеріалів, що особливо важливо для економії металу та зниження загальної маси обладнання.

Одним із потенційно небезпечних елементів, що можуть спричинити ураження електричним струмом, є електроди, які знаходяться під високою напругою відносно заземленої оболонки установки. У конструкції передбачено

розміщення високовольтних електродів всередині обробної камери. Сама камера, керуюча засувка та бункер, розташований над камерою, виготовлені з ізоляційних матеріалів, а зовнішні електроди надійно заземлені. Це забезпечує повну ізоляцію високовольтних елементів від обслуговуючого персоналу. Усі струмопровідні частини підлягають обов'язковому заземленню або зануленню.

Електрична частина установки об'єднує в собі схему керування, схему подачі живлення до регулятора напруги, а також високовольтний трансформатор з помножувачем напруги, що забезпечують подачу високої напруги до системи електродів між якими знаходиться продукція. Електрична схема установки зображена на рис. 4.4.

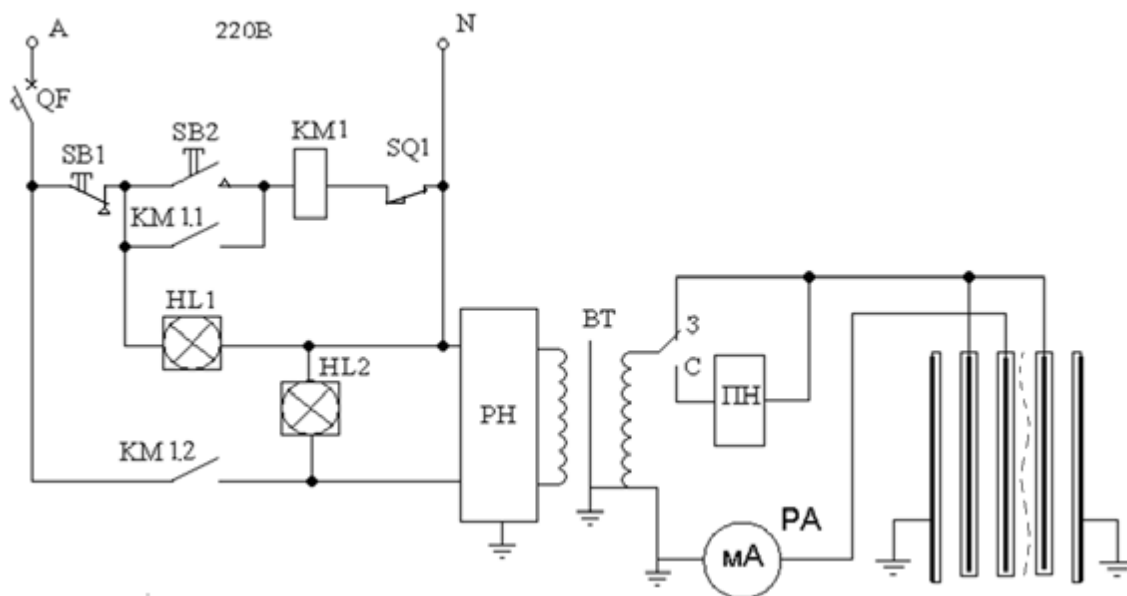


Рис. 4.4 Електрична схема установки для обробки зернових в електричному полі високої напругеності

Установка працює наступним чином: вмикається автоматичний вимикач QF, подається напруга живлення про що сигналізує лампа EL1. Після вмикання кнопки SB2 подається напруга на котушку магнітного пускача KM, і замикаються контакти KM1, KM2 та загоряється сигнальна лампа EL2. Через регулятор напруги живлення подається на високовольтний трансформатор BT. Після трансформатора у колі встановлений перемикач режиму роботи «З»-«С». При незаражуючій обробці перемикач встановлюється в положення «З» і на

електроди камери обробки подається висока напруга змінного струму від трансформатора, при стимулюючій обробці перемикач встановлюється в положення «С» і на електроди камери обробки через помножувач напруги ПН подається висока напруга постійного струму. Також в електричне коло установки включений кінцевий вимикач SQ, який встановлений на двері шафи з високовольтним обладнанням і призначений для відключення живлення установки при спробі відкриття шафи у робочому режимі.

Установка являє собою пересувну малогабаритну конструкцію, в склад якої входить рухома основа на якій розміщені: джерело високої напруги, пульт керування, камера обробки [16]. Схему установки зображено на рис. 4.5, зовнішній вигляд рис. 4.6.

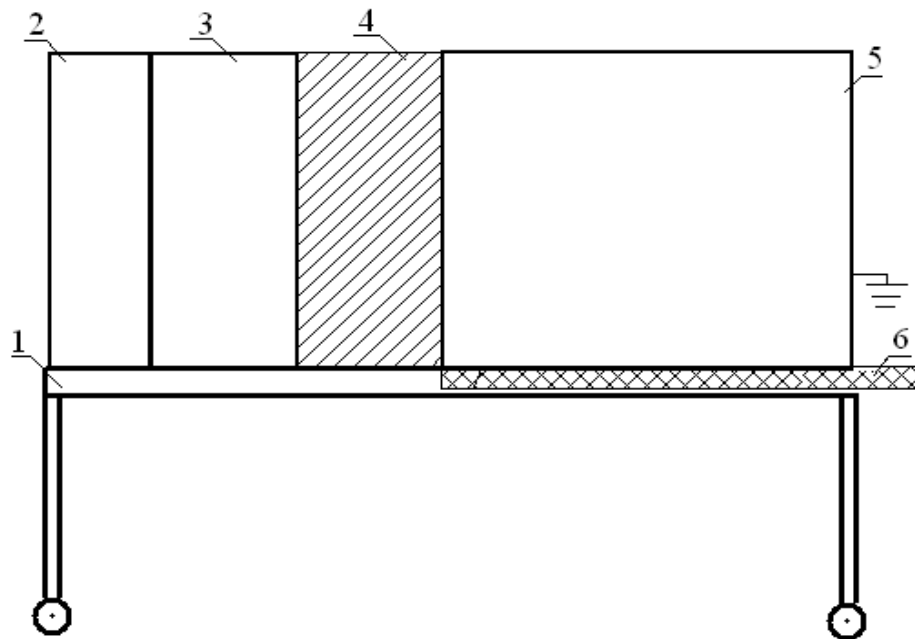


Рис. 4.5 Схема установки для обробки зерна: 1 – мобільна основа для кріплення обладнання; 2 – пульт керування; 3 – джерело високої напруги; 4 – захисний кожух з діелектричного матеріалу, 5 – камера обробки; 6 – засувка з діелектричного матеріалу



Рис. 4.6 Зовнішній вигляд установки для обробки зернових в електричному полі високої напругеності

Пересувна конструкція: являє собою мобільну конструкцію розмірами 1500x900x500 мм, що розміщена на 4 колесах і призначена для розташування всього обладнання, яке входить до складу установки. Вона обладнана спеціальними ручками для можливості переміщення.

Джерело високої напруги: складається із спеціально розробленого та виготовленого однофазного, підвищувального, сухого трансформатора ОСВ – 1,5 220/15000 та помножувача напруги.

Технічні характеристики трансформатора наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Технічна характеристика трансформатора ОСВ – 1,5 220/15000

Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення параметра
1	2	3
Первинна напруга	В	220±6%

Частота мережі живлення	Гц	50
Номінальна потужність	кВА	1,5
Вторинна напруга при номінальному навантаженні	В	15000±5%
Струм холостого ходу	мА	500
К.К.Д., не менше	%	95
Габаритні розміри, не більше	мм	240×230×480
Вага, не більше	кг	55,0

Високовольтний трансформатор у комплекті з напругопомножувачем змонтований на мобільній платформі всередині спеціалізованої шафи. Електроживлення пристрою здійснюється через пульт керування за допомогою двожильного кабелю перерізом $2 \times 2,5$ мм². Передача високої напруги до електродів виконується через високовольтний провід, наприклад, марки КВПЭВ–2к. Зовнішній вигляд трансформатора підвищення напруги та самого помножувача показано відповідно на рисунках 4.7 і 4.8.

Вихід високовольтного трансформатора під'єднаний до перемикача режимів роботи: «С» (Стимуляція) або «З» (Знезараження). Вихід перемикача в положенні «З» з'єднаний із вертикальними пластинчастими електродами, що працюють під високою напругою. У положенні «С» вихід перемикача під'єднується до каскадного напругопомножувача, до виходу якого також приєднані вертикально орієнтовані високовольтні пластинчасті електроди. Схема напругопомножувача реалізована за принципом каскадного випрямлення. Як елементи помножувача можуть використовуватись високовольтні діоди типу Д1008 у кількості 8 одиниць та конденсатори типу К15-4 у кількості 4 штук. Загальна кількість каскадів становить два.

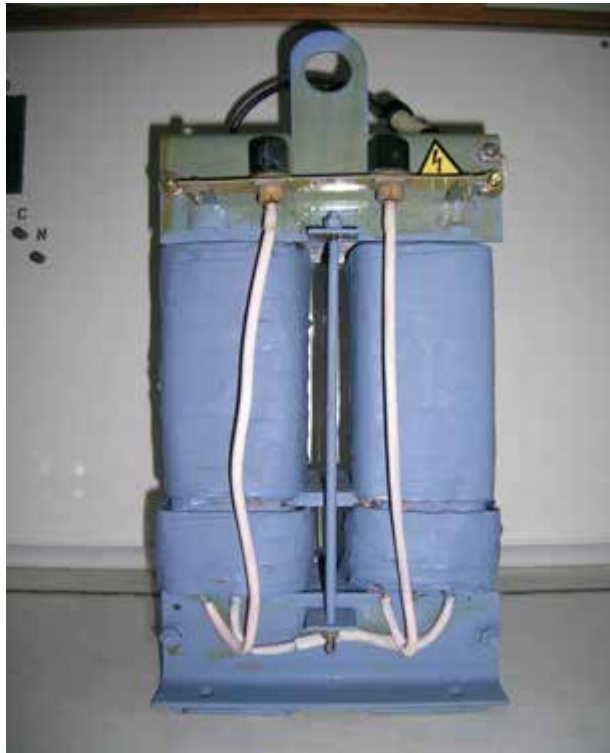


Рис. 4.7 Високовольтний трансформатор сухий ОСВ – 1,5 220/15000



Рис. 4.8 Каскадний помножувач напруги

Робочий режим установки регулюється шляхом зміни напруги на первинній обмотці трансформатора. У зв'язку з цим виникла потреба визначити співвідношення між напругою на вторинній обмотці та величиною напруги, що

подається на первинну. Графік цієї залежності наведено на рис. 4.9. Вимірювання проводилось за умови відсутності навантаження.

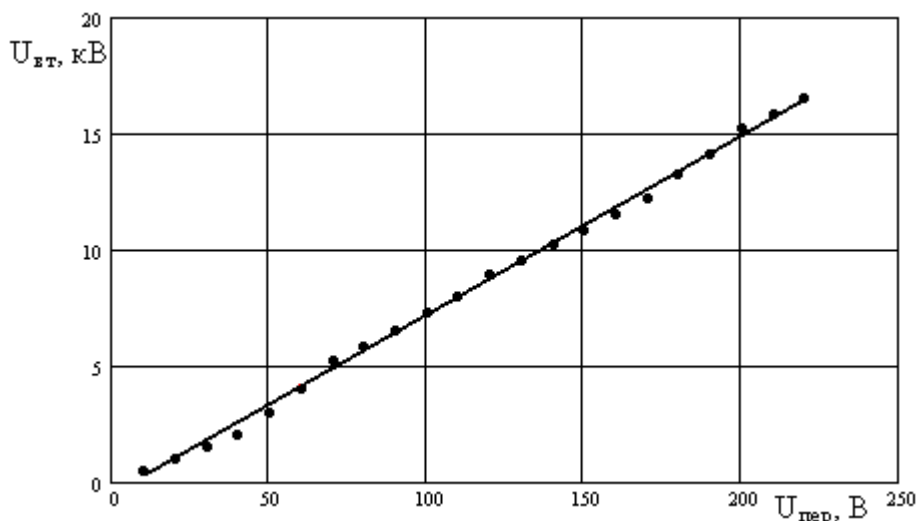


Рис. 4.9 Залежність вторинної напруги трансформатора від первинної

Пульт керування розташовано в окремій шафі розміром 600×500×300 мм. На кришці (фронтальній панелі) пульта встановлено пуско-регулювальні елементи. З одного з боків пульта розміщено апаратуру для регулювання та контрольні-вимірювальні прилади. Електроживлення пульта здійснюється від стандартної мережі змінного струму з напругою 220 В та частотою 50 Гц. Регулювання вихідної високої напруги виконується зміною поданої напруги на первинну обмотку автотрансформатора типу РНО-250 або за допомогою електронного регулятора напруги. Величина високої напруги визначається за допомогою дільника напруги, виконаного на основі послідовно з'єднаних резисторів типу КЕВ, або за допомогою кіловольтметра типу С-96.

Камера обробки виготовляється з ізоляційного матеріалу, наприклад оргскла товщиною 10 мм. Усередині камери розташовані високовольтні електроди за схемою “площина – площина”. Під час проведення знезаражувальної обробки в камері встановлюються діелектричні пластини, які відокремлюють зерно від електродів і запобігають надмірному струмопроводенню. Простір між електродами формує об'єм камери обробки. Загальна кількість електродів — щонайменше 11, у цьому прикладі — 15.

Висота кожного електрода складає 500 мм, ширина — 400 мм. Розмір площини електродів обмежується лише допустимим номінальним струмом джерела високої напруги, а відстань між електродами визначається величиною прикладеної напруги. Зовнішні електроди занулено та заземлено. Принципова електрична схема камери обробки показана на рис. 4.10, її зовнішній вигляд — на рис. 4.11.

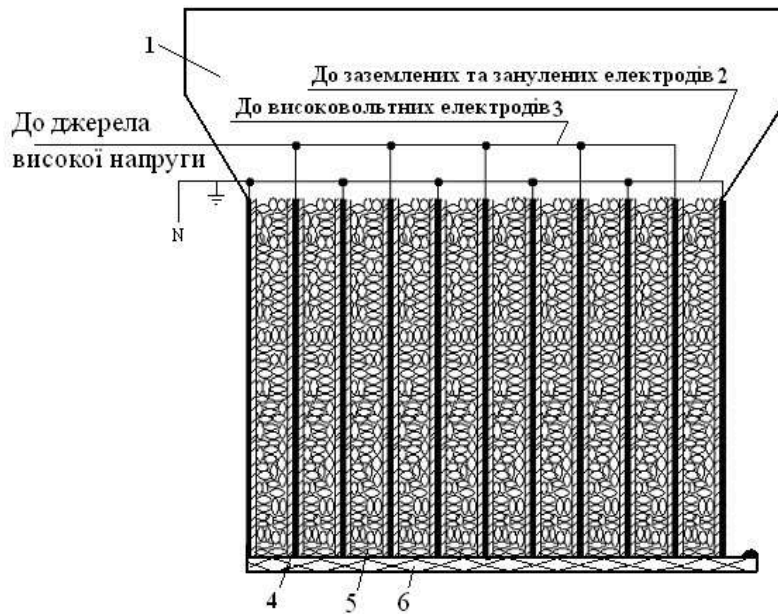


Рис. 4.10 Схема камери обробки де, 1 – бункер; 2 – заземлені електроди; 3 – високовольтні електроди; 4 – пластини з діелектричного матеріалу; 5 – зернова маса; 6 – засувка



Рис. 4.11 Зовнішній вигляд камери обробки

Розроблена установка може використовуватися, як у технологічних процесах знезараження зернових, так і з метою передпосівної стимуляції насіння. При режимі стимуляції насіння сільськогосподарських культур до електродів підводиться висока напруга постійного струму, що обумовлено біологічною дією на насіння при такому виді електрофізичної обробки. Застосування сильних електричних полів постійного струму для передпосівної стимуляції насіння обґрунтовано у наукових працях д.т.н. Береки О. М. [17]. Для знезаражуючої обробки зернових запасів при зберіганні необхідні технологічні режими при яких необхідна концентрація озону утворювалася б з меншими енергетичними затратами і було б відсутнє стимулювання насіння. Ці умови досягаються при використанні сильного електричного поля змінного струму. Тому, що при змінному струмі інтенсивність часткових розрядів більша ніж при постійному, а відповідно і концентрація озону більша. Також при змінному струмі у міжклітинній рідині зернин відсутній масоперенос іонів, що є одним із головних факторів біологічної стимуляції зерна при даному способі обробки.

Під час виконання технологічного процесу стимуляції насіння перемикач режиму роботи встановлюється в положення «С» (Стимуляція), а з камери обробки попередньо виймаються діелектричні пластини. Після цього у камеру засипається насіннєвий матеріал.

Далі вмикається регулятор напруги, внаслідок чого автоматично активуються високовольтний трансформатор та двополярний каскадний помножувач напруги. Отримана висока напруга постійного струму подається на вертикально розміщені пластинчасті електроди.

Насіння рівномірно заповнює простір між паралельно розташованими плоскими електродами, де піддається дії електричного поля високої напруженості. Подається напруга такої величини, яка забезпечує необхідну густину електричного струму, оптимальну для конкретної сільськогосподарської культури. Наприклад, для ячменю з кондиційною вологістю цей параметр становить у межах 30...90 мА/м².

У виробничому циклі дезінфекції виробів селектор функціонування встановлюється в позицію "З", після чого у відсік опрацювання розміщуються ізоляційні пластини. До камери для обробки засипається сировина. Активується регулятор напруги, що автоматично запускає трансформатор високої напруги, внаслідок чого підвищений потенціал змінного струму подається на пластинчасті електроди високої напруги. Матеріал, відокремлений від електродів ізоляційними пластинами, перебуває під впливом змінного електромагнітного поля значної інтенсивності. При відповідній потужності електричного впливу в повітряних проміжках зернової маси виникають часткові розряди, і в усьому об'ємі формується озон, концентрація якого контролюється інтенсивністю електромагнітного поля змінного струму. Після належного витримання за допомогою шибера сировина під власною вагою вивантажується з відсіку обробки.

Перевагами створеного пристрою порівняно з іншими технічними засобами електрофізичної обробки зерна є: здатність опрацьовувати насіннєвий матеріал для поліпшення посівних характеристик та антисептичної обробки під час зберігання, компактність конструкції та енергоефективність, відсутність мутагенного впливу на зерно і екологічність виробничого циклу, застосування енергії електричного поля як безпосереднього робочого механізму без додаткових перетворень. Відтак розширено функціональні можливості розробленого обладнання.

4.3. Розробка та дослідження експериментальної установки з інтеграцією SCADA-системи

Розроблений спосіб знезаражуючої обробки зернової маси передбачає вплив на шкідливу мікрофлору озоном, який утворюється під дією електричного поля високої напруженості. Такий метод є ефективним для знищення бактерій, вірусів та інших мікроорганізмів у повітрі та на поверхнях, зокрема в агропромисловості [18]. Для реалізації цієї технології було

розроблено спеціальну установку, яка здатна забезпечити необхідні параметри обробки.

Технічні засоби, що використовуються для обробки зернової маси з використанням електричного поля високої напруженості, мають відповідати наступним вимогам:

- забезпечення напруженості поля не менше 5,5 кВ/см з можливістю регулювання;
- мінімальні габарити;
- наявність засобів захисту від перевантаження;
- безпечність для обслуговуючого персоналу.

Конструкція установки розроблена таким чином, що зовнішні електроди заземлені і виконують роль кожуха, завдяки чому знижується матеріалоемність конструкції. Високовольтні електроди розміщені всередині камери обробки, яка, як і засувка та завантажувальний бункер, виготовлена з діелектричного матеріалу.

Для забезпечення автоматизації процесу обробки зернової маси та підвищення ефективності роботи установки було інтегровано систему SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Ця система дозволяє здійснювати моніторинг, збір і обробку даних, віддалене керування технологічним процесом і його візуалізацію [19, 20].

Використання SCADA-систем для автоматизації процесів знезараження зерна є важливим етапом у сучасному агропромисловому комплексі, де автоматизація технологічних процесів забезпечує високу ефективність і якість виробництва. Знезараження зерна, як критичний етап, безпосередньо впливає на збереження продукції та її безпечність для споживачів. Впровадження SCADA-систем дозволяє значно підвищити рівень контролю та управління цими процесами, забезпечуючи моніторинг та оперативне управління ключовими параметрами [20, 21].

Традиційні методи знезараження зерна часто залежать від хімічних засобів, що можуть негативно вплинути на якість продукції та навколишнє

середовище. Додатково, ручне управління є трудомістким і не завжди точним. Автоматизація процесів знезараження за допомогою SCADA-систем дозволяє:

- забезпечити постійний моніторинг параметрів процесу в режимі реального часу;
- миттєво реагувати на відхилення від заданих параметрів;
- зменшити вплив людського фактору і мінімізувати ризик помилок;
- оптимізувати використання ресурсів, підвищуючи економічну ефективність [20, 22].

SCADA-системи застосовуються для моніторингу температури та вологості зернової маси, оскільки ці параметри впливають на розвиток мікроорганізмів та шкідників. Вони збирають дані з датчиків, що дозволяє оперативно виявляти і реагувати на небажані зміни. Також ці системи автоматично керують роботою вентиляційних та сушильних установок, створюючи оптимальні умови для зберігання зерна та запобігаючи його самозігріванню [21].

SCADA-системи можуть автоматизувати процеси знезараження, забезпечуючи точне дозування знезаражувальних засобів та контроль їх ефективності [20].

Для ефективного контролю стану зерна під час зберігання та знезараження використовуються спеціалізовані датчики температури та вологості, інтегровані в SCADA-систему. Вони дозволяють отримувати точні дані про стан зернової маси в режимі реального часу, виявляти потенційні проблеми на ранніх етапах і вживати необхідних заходів для їх усунення [21]. Автоматичне регулювання параметрів зберігання та знезараження підтримує оптимальні умови.

Контроль температури зерна є найефективнішим способом відстеження біохімічних процесів у зерновому насипу. Оперативний контроль температури та вологості важливий на всіх етапах технологічного циклу виробництва зерна, оскільки температура зернового насипу дає уявлення про інтенсивність дихання зерна та активність мікроорганізмів, що впливає на якість зерна [21].

Окрім температури та вологості, важливим аспектом є моніторинг рівня забруднення зерна мікроорганізмами та шкідниками. Сучасні аналізатори забруднення, інтегровані в SCADA-систему, дозволяють виявляти наявність патогенних мікроорганізмів та шкідників, оцінювати ефективність знезараження і своєчасно вживати додаткові заходи для запобігання поширенню забруднення. Інтеграція цих аналізаторів забезпечує комплексний підхід до контролю якості зерна, підвищуючи безпеку та якість кінцевої продукції [21].

Система дозволяє візуалізувати параметри, такі як напруга, вологість, температура, продуктивність тощо, що дає змогу здійснювати моніторинг стану процесів у реальному часі. Це дозволяє користувачам оцінювати поточні умови та ефективність роботи обладнання.

Крім того, вона забезпечує керування процесом знезараження, включаючи вмикання і вимикання генераторів та регулювання подачі зерна, що дає можливість точно налаштувати процеси згідно з необхідними параметрами.

Система також здатна записувати історичні дані та формувати звітність, що дозволяє проводити аналіз зміни показників, зберігати важливу інформацію для подальших перевірок і оцінок [22].

Інтеграція з датчиками та контролерами (PLC) дозволяє отримувати точні дані про параметри процесу та здійснювати автоматичне регулювання в реальному часі, забезпечуючи оптимальну взаємодію всіх компонентів автоматизованої установки [22].

4.4. Реалізація SCADA-системи для знезараження зернових

Для реалізації системи знезараження зернових було створено веб-інтерфейс SCADA-системи з використанням сучасних технологій, таких як React для фронтенду та бібліотек для побудови графіків і форм керування. Інтерфейс дозволяє оператору запускати та зупиняти процес обробки, задавати параметри напруги та струму, а також моніторити показники температури та

вологості в реальному часі. Наприклад, для керування напругою використовується наступний фрагмент коду:

```
<input
  type="range"
  min="0"
  max="100"
  value={voltage}
  onChange={(e) => setVoltage(Number(e.target.value))}
/>
<p>{voltage} кВ</p>
```

Рис. 4.12. Елемент інтерфейсу SCADA-системи для регулювання напруги в режимі реального часу

Цей підхід забезпечує інтерактивне керування параметрами та візуалізацію їх змін у реальному часі.



Рис. 4.13. Візуальний інтерфейс SCADA-системи для моніторингу та керування процесом знезараження зерна з графіком технологічних параметрів

Інтерфейс SCADA-системи відображає технологічну схему установки, значення параметрів (температура, вологість, напруга, струм), стан кожного елемента (вкл/викл, аварія, обслуговування) та графіки змін параметрів у часі. Такий підхід до дизайну НМІ (Human-Machine Interface) сприяє підвищенню ефективності та безпеки операційного процесу [23].

Для розширення функціональності SCADA-системи передбачено інтеграцію з IoT-платформами, такими як ThingsBoard [24]. Це дозволяє здійснювати віддалений моніторинг і керування процесом знезараження через інтернет, отримувати сповіщення про аварійні ситуації та зберігати історичні дані для подальшого аналізу. Використання протоколів MQTT або HTTP API забезпечує надійний зв'язок між SCADA-системою та IoT-пристроями [25].

Інтеграція SCADA-системи з мобільними застосунками дозволяє операторам здійснювати керування процесом знезараження з будь-якого місця. Мобільний застосунок, розроблений на основі Flutter або React Native, може забезпечувати запуск та зупинку процесу, відображення критичних параметрів та надсилання сповіщень у разі виявлення відхилень [26, 27].

Розроблена SCADA-система для знезараження зернових забезпечує ефективно та безпечно керування технологічним процесом. Інтеграція з IoT-платформами та мобільними застосунками розширює можливості системи, дозволяючи здійснювати віддалений моніторинг, аналіз даних та оперативне реагування на зміну параметрів процесу.

4.5. Висновки до розділу 4

Розроблено спосіб та технологічний процес знезаражуючої обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості, що відзначається екологічністю, відсутністю впливу на біологічну структуру зерна та економічністю. Спроектовано технологічну лінію та експериментальну установку з оптимізованою конструкцією, де зовнішні електроди виконують функцію захисного кожуха.

Інтегрована SCADA-система забезпечує моніторинг, збір даних і дистанційне керування процесом в реальному часі. Розроблена установка є універсальною та може використовуватись як для знезараження зернової маси (із застосуванням змінного струму), так і для передпосівної стимуляції насіння (з використанням постійного струму). Інтеграція з IoT-платформами та мобільними застосунками розширює функціональність системи, підвищуючи ефективність та безпеку технологічного процесу.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

5.1. Дослідження впливу знезаражуючої обробки на життєдіяльність мікрофлори зерна та його посівні якості

Висока якість насіння є однією із головних умов отримання високих і якісних врожаїв сільськогосподарських культур. Насіння сільськогосподарських культур багате білками, вуглеводами і мінеральними речовинами, представляє собою хороший живильний субстрат для життєдіяльності і зберігання патогенних мікроорганізмів. Насінням можуть розмножуватися багато хвороб, що погіршують якість і знижують врожай.

У наслідок посіву зараженого насіння хвороби передаються на рослини в період вегетації обумовлюючи зараження нового врожаю.

Дослідження впливу знезаражуючої обробки проводили в двох напрямках. Вплив на мікроорганізми, які викликають псування насіння при зберіганні та вплив на хвороботворні мікроорганізми, які проявляються при висіві насіння.

Серед мікроорганізмів, що негативно впливають на збереження якості насіння під час зберігання, найбільш небезпечними та стійкими до різних методів знезараження є плісняві гриби. У підрозділі 1.2 цієї роботи наведено результати досліджень життєздатності спор пліснявих грибів, які розвивалися на зерні пшениці та ячменю з вологістю 25%. Було встановлено, що зниження життєздатності спор на рівні 99,8–99,9 % досягалося при концентрації озону 350 мг/м³ та експозиції не менше 2 хвилин. За концентрації 150 мг/м³ при такій самій тривалості обробки цей показник коливався в межах 33,8–76,5 %. Водночас варто зазначити, що в зазначених дослідах озон подавався у зернову масу через трубопровід, і його концентрація фіксувалася на виході з озонатора, а не безпосередньо в зерні.

Оскільки озон характеризується високою швидкістю розкладання, фактична концентрація активної речовини в зоні контакту із зерном була значно нижчою. До того ж озон активно реагує з поверхневими шарами зернової маси

та слабо проникає у її глибину, що зумовлює нерівномірність обробки. У зв'язку з цим виникла необхідність проведення експериментальних досліджень на вдосконаленій установці із вимірюванням концентрації озону безпосередньо в об'ємі зернової маси.

Дослідження проводили на пшениці сорту Подолянка при температурі повітря 19,30С та вологості 70%. Режими обробки наведені в таблиці 5.1

При режимах обробки I – III насіння обробляли озоном протягом 5 хв; при IV – VI режимах - 3 хв, потім установку вимикали, насіння перемішували і знову обробляли ще 2 хв.

Таблиця 5.1

Режим обробки зернової маси пшениці сорту Подолянка в електричному полі високої напруженості

Показник	Режими обробки					
	I	II	III	IV	V	VI
Напруженість поля, кВ	5,3	6,7	7,3	5,3	6,7	7,3
Струм, що проходить через зернову масу, мкА	21	36	70	25	38	70
Час обробки, хв.	5	5	5	3+2	3+2	3+2

Видовий склад збудників хвороб насіння озимої пшениці визначали за методиками, наведеними у працях Н.А.Наумової. Результати наведені в табл. 5.2.

У результаті проведених досліджень на насінні пшениці було виявлено паразитичні та сапрофітні мікроорганізми [28].

Шкідливість хвороб насіння, викликаних паразитичними організмами, проявляється різноманітно, залежно від патогенності організму, глибини його проникнення та розташування в насінні, а також від умов навколишнього середовища.

Негативний вплив полягає в пошкодженні тканин насіння, що призводить до зниження його схожості, ослаблення проростків, відсутності сходів і

зрідження посівів. Одним з поширених паразитичних мікроорганізмів є гриби роду *Fusarium*, де деякі види були виявлені на дослідженому насінні.

Таблиця 5.2

Видовий склад збудників на поверхні насіння

Варіант		видовий склад збудників								
		<i>Alternaria alternata</i>	<i>Alternaria tenuis</i>	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	<i>Penicillium sp.</i>	<i>Fusarium graminearum</i>	<i>Fusarium sporotrichiella</i>	<i>Fusarium culmorum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Fusarium moniliforme</i>
Контроль		14,25	21,75	3,25	5	5	25,5	2,75	5,5	3,25
5,3 кВ/см	без переміщення	13,25	10,75	2,5	0,25	2,5	11,25	1	2	1,5
6,6 кВ/см		10,5	10,5	1	0	2,5	5,25	1	1,5	1
7,3 кВ/см		8,25	9	1,25	0	1	5,75	1,25	0,5	0
5,3 кВ/см	з переміщенням	12,5	10,25	2,5	0	2	15,25	1	1	0,75
6,6 кВ/см		8	12	1	0	1	12	1	1	1
7,3 кВ/см		12,25	11,5	1,5	0	2,25	8,5	1	1,25	1

Хоча деякі види цього роду пристосувалися до розвитку на вегетативних рослинах, набуваючи паразитичних властивостей, інші види слабо розвиваються на рослинах під час вегетації, а проявляють активність переважно в період зберігання насіння, коли життєві процеси в ньому заторможені.

В результаті обробки кількість насіння, зараженого *Fusarium sporotrichiella* Bilai, зменшилась на 80 %, *Fusarium graminearum* Schw – на 80 %, *Fusarium culmorum* (W. C. Sm.) Sacc – на 64 %, *Fusarium oxysporum* Shlecht – на 80 % і *Fusarium moniliforme* Sheld – на 85 % (рис. 5.1).

Серед виявлених грибів до паразитичних слід віднести *Bipolaris sorokiniana* shoemaker, що викликає кореневу гниль після посіву насіння. Ефективність знищення цього збудника становила 70%. Як і у випадку з паразитичними фузаріозами, найкращий результат був досягнутий при напруженості поля 6,6 кВ/см.

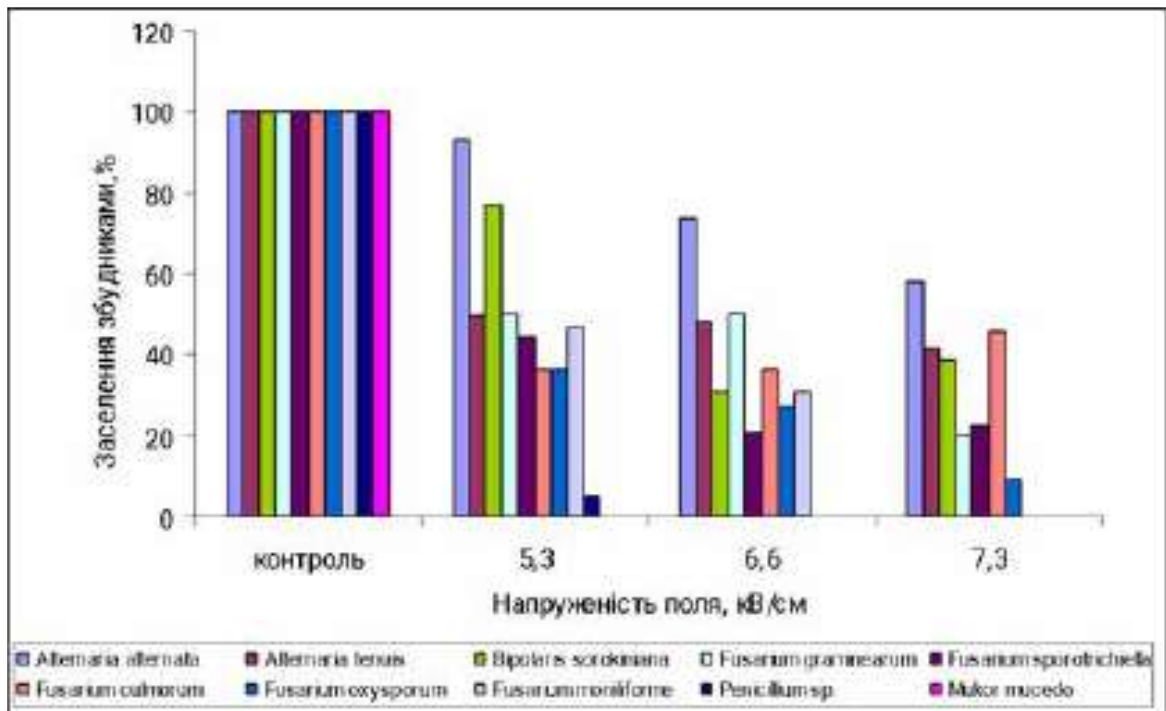


Рис. 5.1 Вплив озону на мікrobiоту насіння озимої пшениці сорту Подолянка

Окрім паразитичних організмів, на поверхні насіння різних культур зазвичай знаходиться велика кількість сапрофітних мікроорганізмів, спор грибів і бактерій, які потрапляють на насіння під час його досягання на материнській рослині. В умовах високої вологості повітря або підвищеної вологості насіння багато сапрофітних мікроорганізмів починають швидко розвиватися, що призводить до загибелі здорового насіння.

Серед сапрофітних найбільш небезпечними є гриби роду *Alternaria*, оскільки вони можуть розвиватися без надмірної вологості насіння. В результаті обробки кількість зернівок, заражених збудниками *Alternaria alternata* Keis, зменшилася на 43 % порівняно з контролем, а *Alternaria tenuissima* (Kunze ex Nees et T.Nees: Fries) Wiltshire – на 59%. Найефективніший вплив на ці збудники, так само як і на сапрофітні фузаріози, спостерігався при обробці зернової маси в електричному полі з напруженістю 7,3 кВ/см. Також на контролі була зафіксована присутність представників роду *Penicillium* та *Mukor mucedo*, для розвитку яких необхідно велика кількість вологи. В оброблених варіантах

Penicillium виявлено лише при мінімальному режимі обробки, а *Mukor mucedo* було повністю знищено при всіх режимах обробки.

Також були проведені дослідження де зернова маса оброблялась на протязі 3 хв потім установка вимикалась, насіння перемішувалось і установка вмикалась ще на 2 хв.

Отримані результати мікологічного аналізу виявились гірші ніж у варіантах, де насіння не перемішували.

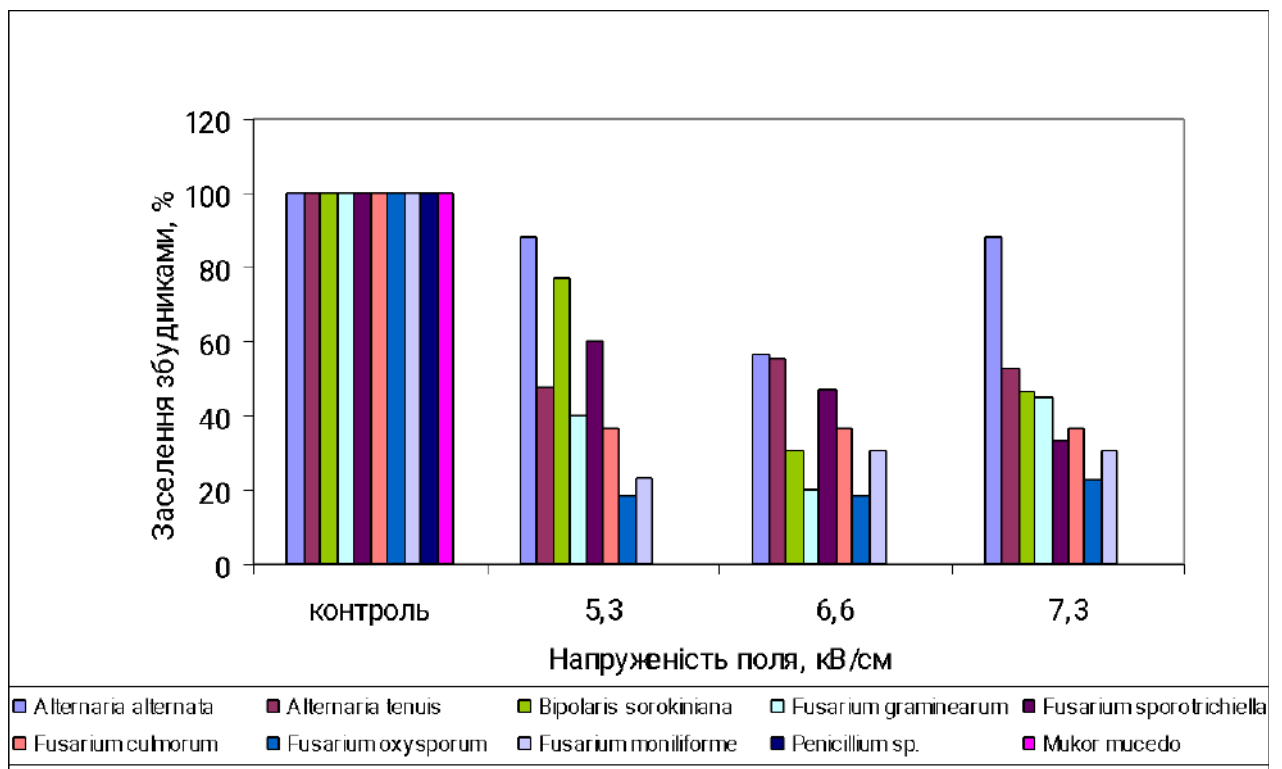


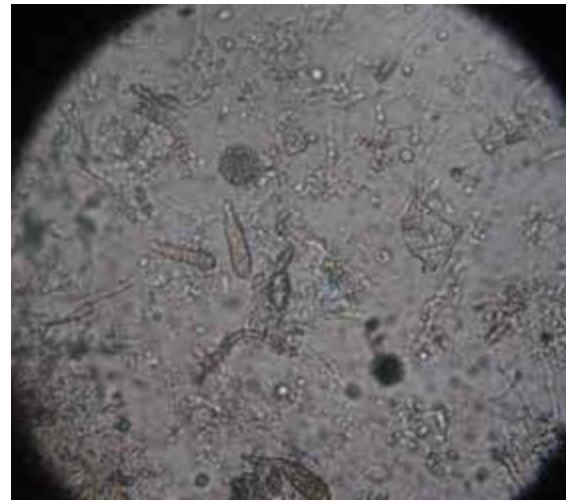
Рис. 5.2 Вплив озону на мікобіоту насіння озимої пшениці сорту Подолянка (насіння перемішували)

Здійснені дослідження показали, що гриби з різних родів по-різному реагують на обробку озоном. Так, представники роду *Penicillium* та *Mukor mucedo* знищуються майже на 100% при обробці зернової маси озоном, який утворюється в ній під впливом електричного поля високої напруженості. Гриби роду *Fusarium* реагують на озон по-різному залежно від їх паразитичних або сапрофітних властивостей, але запропонований метод дозволяє знищити

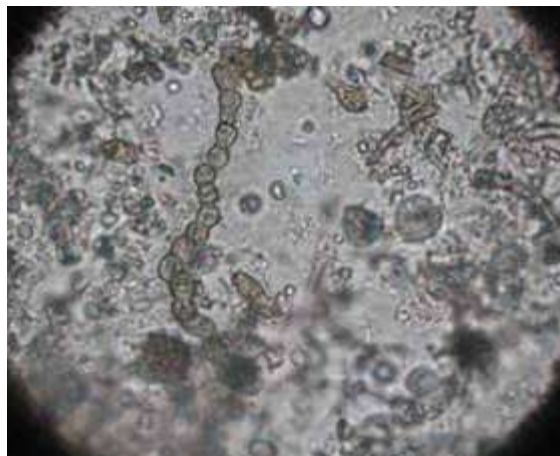
близько 80% представників цього роду. Найбільш стійкими виявилися гриби роду *Alternaria*, яких вдалося знищити на 50%.



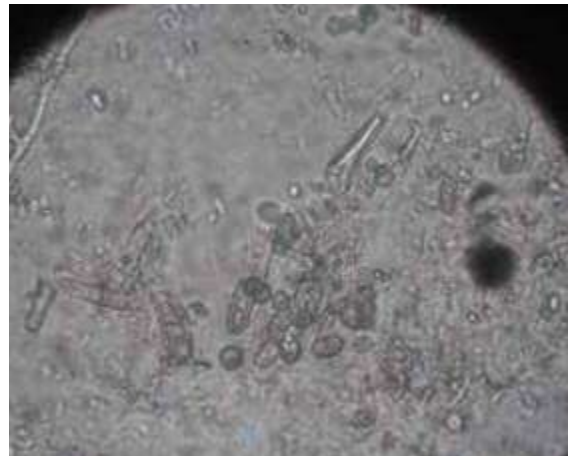
а)



в)



б)



г)

Рис. 5.3 Вплив озону на конідії пліснявих грибів: а,б) контроль, в,г) варіант оброблений в електричному полі високої напруженості змінного струму

На поверхні насіння, окрім паразитичних та сапрофітних грибів, є велика кількість патогенних мікроорганізмів, що перебувають у стані спокою і активізуються лише під час молочної стиглості. Найбільш небезпечною з них є тверда сажка. Недбале ставлення до цієї хвороби може призвести до повної втрати врожаю.

Тверда сажка пшениці може бути спричинена двома видами грибів – *Tilletia caries* і *Tilletia levis*, які зустрічаються в насінневому матеріалі у вигляді домішок – сажкових зерен (мішечків) або спор, що прилипають до поверхні насіння. Спори потрапляють на насіння ще під час збирання врожаю і залишаються в стані спокою. При посіві насіння спори проростають і проникають у молоді проростки. Найбільше зараження відбувається при сильному зволоженні поверхні насіння і низьких температурах. Міцелій гриба розвивається разом з рослиною, досягаючи колосу. Гриб руйнує зав'язі колосків, і після дозрівання міцелій розпадається на спори. Хворі колоски наповнюються масою сажкових спор, які покривають зерно. Чим більше спор сажки присутне на посівному зерні, тим вищий відсоток заражених колосків у новому врожаї.

Інфіковані рослини мають менший розмір стебла і колоса на 15–20 см порівняно зі здоровими. При зараженні зменшується маса 1000 зерен, в колосі формується менше зернівок на 10–15 %, їх якість знижується. Окрім кількісних втрат врожаю, тверда сажка погіршує якість продукції — сажкове зерно стає непридатним для споживання та корму через накопичення в ньому триметиламіну. Хімічні методи боротьби з цією хворобою часто не дають бажаних результатів.

Режими обробки наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Режими обробки зернової маси пшениці сорту Подолянка в електричному полі високої напруженості

	Режими обробки				
	I	II	III	IV	V
Напруженість поля, кВ/см	5,3	6,7	8	5,3	6,7
Струм, що проходить через зернову масу, мкА	20	50	90	20	50
Концентрація озону в об'ємі зернової маси, мг/м ³	106	176	281	106	176

Час обробки, хв.	5	5	5	10	10
------------------	---	---	---	----	----

5.2. Техніко – економічні показники роботи установки при обробці зернової маси

Оцінка економічної ефективності базується на визначенні річного ефекту, який можна досягти завдяки заощадженню хімічних протравлювачів, зменшенню втрат зерна під час зберігання та отриманню додаткового врожаю. Розрахунки проводились з використанням існуючих методик для оцінки економічної ефективності в енергетичному секторі та сільському господарстві.

Оскільки на сьогодні установки для обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості змінного струму не випускаються, при визначенні економічного ефекту приймається відсутність бази для порівняння. Вартість усіх компонентів, що використовуються для розрахунку ефективності, була взята за 2010 рік.

Для встановлення ефективності використання установки необхідно визначити наступні показники:

- чистий дисконтний прибуток (ЧДП);
- індекс прибутковості (ІП);
- внутрішня норма прибутковості (ВНП);
- термін окупності.

Чистий дисконтний прибуток визначаємо за виразом:

$$\text{ЧДП} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot \frac{1}{(1 + E)^t} - K, \quad (5.1)$$

де R_t – результати, які досягаються на кроці t ;

Z_t – витрати, які здійснюються на кроці t (без капітальних вкладень);

T – тривалість розрахункового періоду;

E – постійна норма дисконту;

K – капітальні вкладення.

Норма дисконту має постійне значення $E = 0,15$.

Прибуток, що отримують на протязі одного з років розрахункового періоду можна визначити за виразом:

$$R_t = R_{до} + R_{оз} + R_n, \quad (5.2)$$

де $R_{до}$ – вартість додатково отриманого зерна;

$R_{оз}$ – вартість додатково збереженого зерна при зберіганні;

R_n – вартість заощаджених протравлювачів.

Капітальні вкладення будуть визначатися лише вартістю установки:

$$K = B_{уст}, \quad (5.3)$$

де $B_{уст}$ – вартість установки;

Індекс прибутковості визначається за виразом:

$$IP = \frac{1}{K} \cdot \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot \frac{1}{(1+E)^t}. \quad (5.4)$$

Значення індексу прибутковості буде визначати ефективність розробленого проекту і буде взаємопов'язано з чистим дисконтним прибутком. Проект буде прибутковий, коли індекс прибутковості буде перевищувати 1.

Внутрішня норма прибутковості $E_{ВН}$ (ВНП) визначає прибуток, який необхідно отримати, щоб повернути кошти витрачені на реалізацію проекту, $E_{ВН}$ визначається за виразом:

$$\sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E_{ВН})^t} = \sum_{t=0}^T \frac{K}{(1 + E_{ВН})^t} \quad (5.5)$$

ВНП повинен перевищувати кошти, що витрачені на реалізацію проекту. Тільки у такому випадку може бути прийняте рішення про доцільність інвестування. В іншому випадку інвестиції в цей проект невиправдані.

Одним з важливих показників інвестованого проекту є його час окупності. Тобто час за який кошти витрачені на реалізацію проекту будуть повернені і в подальшому отримуватимемо лиш чистий прибуток, що визначатиме позитивність інтегрального ефекту.

Коефіцієнт очікуваних втрат рівний нулю, що дає змогу зробити висновок про незначний ризик, пов'язаний із використанням установки для обробки зерна в електричному полі високої напруженості.

5.3. Висновки до розділу 5

Досліджено ефективність обробки зернової маси в електричному полі високої напруженості з утворенням озону як методу знезараження насіння. Встановлено різну чутливість мікроорганізмів до такої обробки: представники родів *Penicillium* та *Mucor mucedo* знищуються майже на 100%, гриби роду *Fusarium* – близько 80%, найстійкішими виявилися гриби роду *Alternaria* (знищення лише на 50%).

Найефективнішим режимом є напруженість поля 6,6-7,3 кВ/см при концентрації озону 176-281 мг/м³ та безперервній обробці протягом 5 хвилин без перемішування. Економічна оцінка підтверджує перспективність технології через заощадження на хімічних протруювачах, зменшення втрат при зберіганні та покращення посівних якостей насіння. Метод має низький коефіцієнт ризику при впровадженні та представляє екологічно безпечну альтернативу хімічним засобам знезараження.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено обґрунтування енергоефективних режимів знезаражуючої обробки зерна в електротехнологічному комплексі, які базуються на вивченні закономірностей дії електричного поля високої напруженості змінного струму на електрофізичні процеси, що відбуваються в зерновій масі. Запропонований підхід спрямований на зменшення мікробіологічного забруднення та покращення якості зберігання зерна без використання хімічних протруйників, що є актуальним у контексті екологічної безпеки та ресурсозбереження.

Проведений аналіз існуючих методів знезаражуючої обробки зерна, зокрема озонування, показав доцільність застосування цього екологічно чистого засобу, проте традиційні технології з використанням озону супроводжуються значними втратами ефективності через громіздке і матеріаломістке обладнання, що не забезпечує рівномірного розподілу активного агента у зерновій масі. На противагу цьому, розроблений підхід дозволяє інтегрувати озонування безпосередньо в об'єм зерна завдяки створенню умов часткових розрядів у діелектрично ізольованій зерновій масі.

На основі подальшого розвитку теорії часткових розрядів і електричної схеми заміщення зернової маси, що знаходиться між діелектричними пластинами, визначено аналітичні залежності повного струму, які враховують струм зміщення та струм розрядів. Це дозволило встановити кількісні взаємозв'язки між параметрами електричного режиму, властивостями зернової маси та діелектричних матеріалів, зокрема вплив товщини та діелектричної проникності пластин.

У ході експериментальних досліджень розроблено методику дослідження електрофізичних процесів, сконструйовано спеціалізовану камеру для обробки зерна, підібрано тип і параметри діелектричних пластин, а також виготовлено джерело живлення з вихідними характеристиками: напруга до 15 кВ і струм до

100 мА. Це дало змогу змодельовати та реалізувати робочі умови, максимально наближені до промислових.

Отримано залежності зміни концентрації озону в об'ємі зернової маси від напруженості електричного поля, вологості зерна та товщини діелектричних пластин. На основі цих даних обґрунтовано вибір діелектричних вставок з поліетилену товщиною 0,5 мм як оптимального варіанту. Встановлено ефективні межі вологості зерна у межах 14–14,5 %, а також визначено оптимальні режимні параметри: напруженість електричного поля — 5–6 кВ/см, густина струму — 25...30 мА/м².

Дослідження ефективності знезараження спор збудника твердої сажки *Tilletia caries* підтвердили здатність розробленої установки до знищення до 90 % спор при дозі 2940 мг·хв/м³. Розроблена номограма дозволяє за умов виробництва легко визначати час експозиції знезараження в залежності від вологості зерна, що спрощує практичне використання установки.

Значну увагу приділено дослідженню впливу обробки на посівні та врожайні характеристики різних культур. Показано, що внаслідок знезараження зменшується ураження проростків у 2,3–5 разів для ячменю, у 2,8–2,9 раза — гречки, у 3,4 раза — соризу, від 3 до 4,3 раза — сорго, майже вдвічі — проса. Це позитивно впливає на врожайність: для ячменю — до 13,5 %, соризу — до 5 %, сорго — до 9 %, проса та гречки — до 10 %. Питомі витрати електроенергії при цьому становлять 1,29–1,62 кВт·год/т, що свідчить про високу енергоефективність процесу.

Для автоматизації процесу знезараження зернової маси, забезпечення моніторингу параметрів у реальному часі, архівації даних, оперативного керування режимами роботи та попередження аварійних ситуацій у роботі комплексу було реалізовано інтеграцію SCADA-системи. Це дозволило забезпечити зручний інтерфейс користувача, централізоване управління та адаптивність системи до змін у параметрах зерна або зовнішнього середовища.

Достовірність отриманих результатів підтверджено коректним використанням методів прикладної математичної статистики, теорії часткових

розрядів та їх узгодженням з експериментальними даними. Проведено техніко-економічний аналіз ефективності запропонованої установки із застосуванням імітаційного моделювання, що дозволило оцінити ризики та змоделювати різні сценарії її використання. За результатами розрахунків, термін окупності установки при обробці 20 тонн зерна становить один рік, а чистий дисконтований прибуток після першого року експлуатації досягає 5200 грн, що свідчить про економічну доцільність і перспективність впровадження технології у практику аграрного виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. AgroExpert. Мікроорганізми та шкідники — мешканці зернової маси. AgroExpert. URL: <https://agroexpert.ua/mikroorhanizmy-ta-shkidnyky-meshkantsi-zernovoi-masy/>.
2. Дудка ЄЛ, Пінчук НІ, Деревенець КА. Епіфітна мікофлора зерна пшениці в період збирання врожаю. Інститут зернового господарства НААН України. URL: <https://institut-zerna.com/library/pdf39/25.pdf>.
3. Гавриленко ОС, Хоміцька ОА, Загорулько ОВ. Оцінка впливу мікробіологічних процесів під час зберігання зерна ярої пшениці. Вісник Полтавської державної аграрної академії. Сільське господарство. Рослинництво. 2016;(4):31-34.
4. Біологічні методи боротьби зі шкідниками сільського господарства. Пропозиція. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnolohiyi-vyroshchuvannya/biolohichni-metody-borotby-zi-shkidnykamy-silskoho>.
5. Біологічний метод захисту рослин. SuperAgronom.com. URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/biologichniy-metod-zahistu-roslin-id20043>
6. Біометод у боротьбі зі шкідниками: як це працює? Kurkul.com. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/566-biometod-u-borotbi-zi-shkidnikami-yak-tsje-pratsyuye>.
7. Грачева Л. И. К вопросу исследования электрофизических характеристик зернопродуктов / Л.И. Грачева, Я.Ф. Меренбах, Н.Н. Шумляк // Усовершенствование режимов работы сельскохо-зяйственных установок. – К.: УСХА, 1978. – С. 57 – 60.
8. Паросток МВ. Мікрохвильова обробка насіння для кращого врожаю. URL: <https://www.parostokmw.com/>.
9. Берека О. М. Електросинтез озону в зерновій масі / О. М. Берека // Филым жене білім. Науково-практичний журнал., 2008. - № 2 (11). - С. 42 – 47.
10. Кравчук Ю. М., Гуменюк В. В. Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської продукції. Київ : НАУ, 2016.
11. Берека О. М. Дослідження концентрації озону у зерновій масі під дією електричного поля високої напруги / О. М. Берека, С. М. Усенко // Наук. вісн. НУБіП України. – 2010. – Вип. 153. – С. 176–182.

12. Берека О. М. Часткові розряди в зерновій масі під дією сильного електричного поля / О. М. Берека, С. М. Усенко // Праці Таврійського держ. агротехн. ун-ту. – 2011. – Вип. 11, Т. 6. – С. 184–190.
13. Берека О. М. Дослідження концентрації озону у зерновій масі під дією електричного поля високої напруги / О. М. Берека, С. М. Усенко // Наук. вісн. НУБіП України. – 2010. – Вип. 153. – С. 176–182.
14. Берека О. М. Дослідження конструктивних параметрів установки для знезаражуючої обробки зернових в електричному полі високої напруженості змінного струму [електронний журнал] : Енергетика і автоматика / О. М. Берека, С. М. Усенко – К.: НУБіП України, 2011. – № 2 (8). – Режим доступу до журналу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2011_2/11bomnac.pdf
15. Застосування озону в сільському господарстві / О. М. Берека, Л. С. Червінський, М. П. Салата, І. П. Назаренко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2006. – Вип. 42. – С. 32 – 37.
16. Берека О. М. Часткові розряди в зерновій масі під дією сильного електричного поля / О. М. Берека, С. М. Усенко // Праці Таврійського держ. агротехн. ун-ту. – 2011. – Вип. 11, Т. 6. – С. 184–190.
17. Берека О. М. Дослідження концентрації озону у зерновій масі під дією електричного поля високої напруги / О. М. Берека, С. М. Усенко // Наук. вісн. НУБіП України. – 2010. – Вип. 153. – С. 176–182.
18. Ozone. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Ozone>.
19. Industrial control system (SCADA). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_control_system.
20. Хитренко, О.О. (2018). SCADA-система забезпечення процесу зберігання зерна в силосі. Магістерська робота, Сумський державний університет. SumDU Repository.
21. Кулінченко, Г.В. (2018). SCADA-система забезпечення процесу зберігання зерна в силосі. Магістерська робота, Сумський державний університет. Есейс Клуб.

22. SCADA-системи в агропромисловості: інтеграція з датчиками та історичний аналіз даних. <https://en.wikipedia.org/wiki/SCADA>.
23. The Next Leap in Industrial Human Machine Interface. AVEVA CitectSCADA.
URL: https://cdn.logic-control.com/docs/Citect%20SCADA/WhitePaper_AVEVA_CitectSCADA_06-18.pdf.
24. ThingsBoard — Open-source IoT Platform.
URL: <https://thingsboard.io/>.
25. SCADA and Mobile Security in the IoT Era. IOActive.
URL: [https://ioactive.com/pdfs/SCADA-and-Mobile-Security-in-the-IoT-Era-Embedi-FINALab%20\(1\).pdf](https://ioactive.com/pdfs/SCADA-and-Mobile-Security-in-the-IoT-Era-Embedi-FINALab%20(1).pdf)
26. Combining IoT and SCADA: Benefits, Challenges, and Process. WebbyLab. URL: <https://webbylab.com/blog/iot-and-scada/>.
27. IoT in Mobile App Development: Impact, Examples & Trends. Coherent Solutions. URL: <https://www.coherentsolutions.com/insights/the-impact-of-iot-on-mobile-app-development>.
28. Берека О. М. Електросинтез озону в насіннєвій масі / О. М. Берека // Праці Таврійського держ. агротехн. ун-ту. – Мелітополь, 2008. – Т. 5, Вип.8. – С. 37 – 43.
29. Кравчук Ю. М., Гуменюк В. В. Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської продукції. Київ : НАУ, 2016.
30. Сахневич В. Г. Визначення технічних і технологічних параметрів електротехнологічних засобів для передпосівної дезінфекції та стимуляції насіння в електричному полі. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2022. № 4. С. 45–52.
31. Мельник І. Ю., Завада В. І. Енергетичні методи підвищення якості зерна. Вісник аграрної науки. 2020. № 5. С. 23–28.
32. Postnikova M., Nazarjan V., Borysenko O. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, № 10. P. 5190.

33. Potoroko I., et al. Development of Efficient Technology for Grain Disinfection. *Agrobiotechnology*. 2021. Vol. 3, № 2. P. 15–22.
34. Technologies for Disinfection of Food Grains: Advances and Way Forward. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 112. P. 1–10.
35. Evaluation of Pathogen Disinfection Efficiency of Electrochemical Systems. *Chemosphere*. 2022. Vol. 287. P. 132–140.
36. Improving Technology for Disinfecting Grain from Pests Using Ultra-High Radiation Frequencies. *Journal of Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 54, № 3. P. 89–95.
37. Гавриленко О. С., Хоміцька О. А., Загорулько О. В. Оцінка впливу мікробіологічних процесів під час зберігання зерна ярої пшениці. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2016. № 4. С. 31–35.
38. Мікроорганізми та шкідники – мешканці зернової маси. *Agroexpert*. URL: <https://agroexpert.ua/mikroorhanizmy-ta-shkidnyky-meshkantsi-zernovoi-masy/>.
39. Біологічні методи боротьби зі шкідниками сільського господарства. Пропозиція. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnolohiyi-vyroshchuvannya/biolohichni-metody-borotby-zi-shkidnykamy-silskoho>.
40. Біометод у боротьбі зі шкідниками: як це працює. *Куркуль*. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/566-biometod-u-borotbi-zi-shkidnikami-yak-tse-prat-syuye>.
41. Parostok MW – Виробник біологічних засобів захисту рослин. URL: <https://www.parostokmw.com/>.
42. SCADA-система забезпечення процесу зберігання зерна в силосі. Сумський державний університет. URL: <https://essaysclub.com.ua/scada-systema-zabezpechennya-protsesu-zberigannya-zern-a-v-silosy/>.

43. SCADA and Mobile Security in the IoT Era. IOActive. URL: [https://ioactive.com/pdfs/SCADA-and-Mobile-Security-in-the-IoT-Era-Embedi-FINALab%20\(1\).pdf](https://ioactive.com/pdfs/SCADA-and-Mobile-Security-in-the-IoT-Era-Embedi-FINALab%20(1).pdf).

44. The Next Leap in Industrial Human Machine Interface. AVEVA CitectSCADA. URL: https://cdn.logic-control.com/docs/Citect%20SCADA/WhitePaper_AVEVA_CitectSCADA_06-18.pdf.

45. Combining IoT and SCADA: Benefits, Challenges, and Process. WebbyLab. URL: <https://webbylab.com/blog/iot-and-scada/>.