МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“___” _____ 20 __ р.
Т.О. Зав. кафедри к.т.н., доцент___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Андрій ВОЙТІК
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема роботи **«ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІБРООЗОНАТОРА»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 41-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _Н7_____
«Агроінженерія»
Дмитро БОНДАРЕНКО
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ___
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність Н7 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Т.О. Завідувач кафедри
_____ Андрій ВОЙТІК
“___” _____ 20 __ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

студенту Бондаренку Дмитру Івановичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи «Обґрунтування параметрів та дослідження роботи віброозонатора»
керівник роботи Іван ЛІСОВИЙ, к.т.н., доцент
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
“1” квітня 20 25 р. № 01-06/62
2. Строк подання студентом роботи 20.05.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи;

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи:

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7			

Студент _____ Дмитро БОНДАРЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 5

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ НАСІННЯ ОЗОНОМ 6

1.1 Особливості процесу озонування насіння 6

1.2 Огляд відомих способів та методів синтезу озону 7

1.3 Перспективи використання обробки насіння озоном 8

1.4 Аналіз обладнання для озонування насіння 10

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ 14

2.1. Комплектування віброозонуючого пристрою для передпосівної обробки насіння 14

2.2 Опис вібраційної установки для озонування насіння 19

2.3 Вплив передпосівної обробки насіння озоном на ріст, розвиток та врожайність 21

Висновки по розділу 22

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ 23

3.1 Характеристика та аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації машини для озонування зерна 23

3.2 Розробка організаційно-технічних заходів щодо забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці на машині для озонування зерна 26

3.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час роботи з машиною для озонування зерна 30

Висновки по розділу 32

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ 33

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 35

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 36

ДОДАТКИ 41

ВСТУП

Підвищення урожайності сільськогосподарських культур є стратегічним пріоритетом для України, що зумовлює значну увагу до цієї сфери як у наукових дослідженнях, так і в практичному сільському господарстві. Забезпечення населення, насамперед, зерновими культурами залишається ключовим завданням аграрного сектору. Однак, поряд із досягненнями сучасного землеробства, існує низка проблем, серед яких вагоме місце займають втрати посівних якостей зерна під час тривалого зберігання на елеваторах та хлібоприймальних пунктах, що, в свою чергу, негативно впливає на загальну урожайність зернових в Україні [31].

Актуальність теми дослідження визначається необхідністю мінімізації втрат зерна при зберіганні шляхом пошуку та впровадження ефективних і екологічно безпечних методів обробки. Одним із перспективних напрямів є використання озону – потужного окислювача з широким спектром антимікробної дії [7, 14]. Його переваги, такі як простота отримання, високий окислювальний потенціал, безвідходність та екологічна сумісність, роблять озонування привабливою альтернативою традиційним методам знезараження [20, 21, 29]. Дослідження впливу озону на мікрофлору зерна вже демонструють високу ефективність у пригніченні розвитку шкідливих мікроорганізмів при незначних концентраціях та короткій експозиції [30, 8].

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні параметрів та дослідженні роботи віброозонатора для підвищення ефективності обробки зерна з метою збереження його посівних якостей.

Предметом дослідження є процес обробки зерна озонованим повітрям, що генерується віброозонатором [32, 33, 34].

Об'єктом дослідження є зерно сільськогосподарських культур (на прикладі пшениці) та мікроорганізми, що впливають на його збереження [26, 29, 35].

Матеріалом дослідження є науково-технічна література з питань зберігання зерна, властивостей озону та технологій його генерації [7, 12, 21], а також результати попередніх досліджень впливу озону на мікрофлору зерна [30, 34].

1 ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ НАСІННЯ ОЗОНОМ

1.1 Особливості процесу озонування насіння

Підвищення ефективності сільського господарства та врожайності є важливим для України, і захист насіння від шкідників та хвороб відіграє ключову роль. У контексті зростаючих вимог до екологічності, озонування розглядається як перспективний метод обробки [25, 27].

Озон є особливою формою кисню, хімічно активним газом з характерним запахом [14, 21, 35]. У промисловості його отримують з повітря за допомогою електричного розряду [10, 15]. Озон є сильним окислювачем з високою реакційною здатністю [7, 14]. Його молекула має триатомну будову [21]. У водному середовищі озон розкладається швидше, особливо при підвищених pH та температурі [23, 17].

Взаємодія озону з органічними сполуками призводить до утворення активних частинок. При певних умовах можуть відбуватися складні хімічні реакції, кінцевими продуктами яких є простіші органічні сполуки. Для прискорення цих процесів іноді використовують лужне середовище.

Озон має виражені антимікробні властивості проти бактерій, вірусів, грибків та спор [15, 16, 17]. Його знезаражувальна дія є значно вищою, ніж у ультрафіолетового випромінювання [1, 10]. Озон ефективно знищує широкий спектр шкідливих мікроорганізмів, пригнічуючи ріст плісняви [30].

Дослідження показали, що обробка зерна пшениці озоном значно зменшує кількість шкідливих мікроорганізмів при низьких концентраціях та короткій обробці [28, 29].

Таким чином, озонування є перспективним методом обробки насіння завдяки своїм потужним знезаражувальним властивостям, екологічній безпеці та потенціалу покращення якості посівного матеріалу [24, 27].

1.2 Огляд відомих способів та методів синтезу озону

Озон утворюється з кисню, і його синтез може здійснюватися різними методами [10, 12]. Найбільш поширеними є електролітичний, хімічний, фотохімічний та електросинтез [10]. Крім того, озон отримують при іонізуючих випромінюваннях та за допомогою бар'єрного розряду [3, 10].

Електролітичний метод синтезу озону відомий давно, проте механізм його утворення до кінця не вивчений. Процес здійснюється в спеціальних електролітичних комірках з використанням розчинів різних кислот (сірчаної, хлорної) або їх солей (перхлорат натрію, перхлорат калію та ін.). Вважається, що при утворенні озону відбувається розкладання іонів та радикалів води й кисню. Електролітичним способом можна отримати концентрований озон (до 58%) [10]. Ефективність процесу залежить від складу електроліту, температури та сили струму. Зазначається, що при електролізі розчинів солей утворення озону відбувається ефективніше та стабільніше, ніж при електролізі розчинів кислот.

Фотохімічне утворення озону відбувається переважно в природних умовах під дією сонячної радіації [22]. Хоча фотохімічний процес є основним механізмом утворення озону в атмосфері, його застосування для промислового синтезу озону є менш поширеним порівняно з електросинтезом (бар'єрним розрядом). Це пов'язано з тим, що фотохімічний метод зазвичай не дозволяє отримувати озон у високих концентраціях і є енергоємним. Проте, він може використовуватися в деяких спеціалізованих застосуваннях, наприклад, у наукових дослідженнях або для отримання озону низьких концентрацій.

В основу промислового одержання озону покладено реакцію розщеплення молекули кисню на атоми під дією тихого або бар'єрного розряду [10]. У розроблених озонаторах часто використовується високоефективний спосіб утворення озону, заснований на використанні поверхневого розряду в повітрі або кисні. Такі генератори забезпечують конкурентоспроможні економічні та технічні показники щодо енерговитрат та концентрації озону [10]. Апарати можуть бути виконані у вигляді переносних настільних блоків з розрядною

камерою коаксіально-циліндричної конструкції. Принцип дії полягає у генерації високовольтних імпульсів, які подаються на електроди розрядної камери, де і відбувається утворення озону з кисню повітря, що проходить через неї [10].

Озонатори на основі бар'єрного розряду є одними з найбільш поширених завдяки своїй ефективності та можливості отримання озону з повітря [10].

1.3 Перспективи використання обробки насіння озоном

Застосування озону в сільському господарстві, зокрема для обробки насіння, відкриває значні перспективи завдяки його унікальним властивостям [7, 25]. На відміну від традиційних методів протруювання насіння, які часто пригнічують розвиток рослин, обробка озоном може активізувати та прискорити їхній ріст [24].

Результати польових досліджень обробки насіння бавовнику озоноповітряною сумішшю порівняно з хімічною обробкою є переконливими. Застосування озону сприяло скороченню загального вегетаційного періоду та термінів дозрівання на 1-2 тижні. Рослини ставали більш стійкими до хвороб, а кількість коробочок на кущах збільшувалася на 3-4, що призводило до зростання врожайності на 10-12%. Крім того, відзначалося покращення якості волокна, зокрема збільшення його штапельної довжини та міцності, а також зміна метричного номера [8].

Озон має виражену бактерицидну, фунгіцидну та дезодоруючу дію, що робить його ефективним для післязбиральної обробки насіння та зерна [4, 19, 27]. Застосування озону істотно збільшує терміни їх безпечного тимчасового зберігання та скорочує час низькотемпературної сушки, що сприяє зниженню пікових навантажень на зернооброблювальне обладнання та енергоємності процесу [29].

Експериментальні дослідження в лабораторних та виробничих умовах підтвердили ефективність озоноповітряної суміші для знезараження, стимуляції та сушки насіння зернових культур [26, 29]. Встановлено збільшення термінів

безпечного зберігання зерна в 1,5-2 рази, підвищення насінних якостей на 15% та зниження тривалості низькотемпературної сушки й витрат енергії на сушку зерна на 15-20% [29].

Зниження енергоємності процесу обробки насіння та зерна та запобігання втратам є найважливішими завданнями сучасних аграрних технологій. Використання озону в цих процесах є перспективним шляхом їх вирішення [31]. Дослідження ряду вчених показали, що застосування озоноповітряних сумішей дозволяє прискорити обробку зерна, знизити його енергоємність, підвищити посівні якості та запобігти псуванню [3, 24, 26].

Особливості дезінфекції озоном включають:

1. Високу дезінфекційну ефективність: У 1,5-5 разів вищу, ніж при ультрафіолетовому випромінюванні [10].
2. Широкий спектр дії: Ефективне усунення багатьох видів хвороботворних бактерій, включаючи віруси [6, 30].
3. Відсутність вторинного забруднення: Озонова дезінфекція призводить до утворення кисню без залишення токсичних речовин [20].
4. Тривалий ефект: Ефект очищеного простору зберігається тривалий час після обробки.
5. Економічність: Низькі енергетичні витрати порівняно з іншими методами дезінфекції.
6. Безпека застосування: Можливість створення портативних пристроїв, що не потребують постійного контролю.

Наукові дослідження також підтверджують екологічну безпеку використання озону для боротьби з комірними шкідниками як альтернативу традиційним пестицидам [2, 5, 9]. Озонування фізично знищує комах на різних стадіях розвитку та не викликає у них звикання [18].

Передпосівна обробка сільськогосподарських матеріалів озоноповітряною сумішшю може значно впливати на інтенсивність та якість процесу [24]. Окрім забезпечення збереження, відзначається позитивний вплив озону на якість

насіння та його підсушуючий ефект [29]. Експерименти показали значне підвищення схожості озонованого насіння зернових культур (пшениці, жита, вівса) порівняно з необробленим [1, 24].

Таким чином, використання озону для обробки насіння має значні перспективи, поєднуючи високу ефективність з екологічною безпекою та потенціалом покращення якісних і кількісних показників урожайності та збереження [7, 8, 25, 29].

1.4 Аналіз обладнання для озонування насіння

Стаціонарні установки для передпосівної обробки насіння:

Характеристика: Призначені для обробки насіння зернових культур озоноповітряною сумішшю безпосередньо на сільськогосподарських підприємствах перед посівом. Забезпечують підвищення схожості, енергії проростання та сили росту рослин завдяки комплексній знезаражувальній та активуючій дії озону. Зазвичай використовуються безбар'єрні озонатори. Приклад: Установка для озонування «Ozone - AGRO 50».

Стаціонарні установки для знезараження зерна при зберіганні:

Характеристика: Використовуються на підприємствах харчової промисловості та в зерносховищах для екологічно безпечного знезараження зерна озоном з метою знищення шкідників, грибків, плісняви та бактерій, а також для збільшення термінів безпечного зберігання. Можуть включати реактор, озонатор та дезінтегратор залишкового озону. Приклад: Установка для знезараження зерна ДЗО - 1,0/2,5.

Електрофізичні установки для передпосівної обробки та зберігання зерна [29]**:**

Характеристика: Поєднують знезараження зерна озоном зі стимуляцією потоком аероіонів у неоднорідному електричному полі для підвищення врожайності. У режимі зберігання використовують озон та позитивні аероіони для пригнічення мікрофлори. Конструктивно включають бункер, камеру

озонування, стимулятори та блок управління. Приклад: Установка електрофізичної обробки зерна.

Озонові комплекси для сільськогосподарських підприємств (багатоцільові):

Характеристика: Розроблені для широкого спектру застосувань на сільськогосподарських об'єктах, включаючи обробку насіння, знезараження зерносховищ, обробку продукції при зберіганні, дезінфекцію приміщень, обробку кормів та води, а також боротьбу зі шкідниками та гризунами. Часто мають регульовану потужність. Приклад: Озоновий комплекс "АГРО-ОЗОН PRO"®.

Локальні озонатори для знезараження зерна при зберіганні:

Характеристика: Портативні пристрої, призначені для обробки невеликих об'ємів зерна, що зберігається в коморах, на токах або в поліетиленових мішках. Вставляються безпосередньо в бурт зерна для знищення мікроорганізмів без негативних хімічних змін. Приклад: Озонатор «Озон 2-20».

Промислові озонатори повітря (універсальні):

Характеристика: Призначені для генерації газоподібного озону з повітря для широкого спектру застосувань, включаючи знезараження зерна, знищення плісняви та грибків, обробку складів та сховищ, дезінфекцію та усунення запахів. Характеризуються високою антимікробною ефективністю та швидкістю дії. Приклади: Промислові озонатори фірми НМФ НАУТЕХ («ОЗОН-НТ10», «ОЗОН-ОНТ10», «ОЗОН-ОНТ2», «ОНТ4»).

Вимірювачі концентрації озону в повітрі:

Характеристика: Прилади, призначені для контролю рівня концентрації озону в повітрі з метою забезпечення безпеки та оптимізації процесів озонування. Можуть бути стаціонарними або портативними з цифровою індикацією. Приклади: Вимірювач концентрації озону в повітрі «НТИКО-1».

Генератори озону на основі імпульсних розрядів:

Характеристика: Окремий тип озонаторів, розроблений для промислових та побутових застосувань, що забезпечує ефективну генерацію озону з відносно низьким енергоспоживанням. Можуть мати різну продуктивність та конструкцію.

Приклад: Озонуючий прилад на основі бар’єрного розряду (розроблений в Інституті електродинаміки).

Побутові озонатори (багатофункціональні):

Характеристика: Пристрої з широким спектром застосувань, включаючи обробку харчових продуктів, очищення повітря, знезараження води, а також передпосівну та післязбиральну обробку зерна. Зазвичай мають меншу продуктивність порівняно з промисловими моделями. Приклад: Багатофункціональний побутовий озонатор GL - 3188.

Мобільні озонові комплекси:

Характеристика: Пересувні установки, призначені для проведення санітарної обробки та знезараження на різних об'єктах сільськогосподарського призначення, включаючи зерносховища, елеватори, транспортні засоби. Забезпечують гнучкість у застосуванні та швидке реагування на потреби в обробці. Приклади: Мобільні озонові комплекси (МОК), МОК-400.

Висновки за оглядом технологій озонування насіння та зерна:

Проведений огляд науково-технічної літератури та представленого обладнання дозволяє зробити наступні висновки:

- **Високий потенціал озонування:** Озон є потужним та екологічно чистим засобом для обробки насіння та зерна, що демонструє високу ефективність у знезараженні від широкого спектра шкідників, мікроорганізмів (грибків, плісняви, бактерій) та вірусів.
- **Різноманітність обладнання:** На ринку представлений широкий спектр обладнання для озонування, що відрізняється за призначенням (передпосівна обробка, знезараження при зберіганні, багатоцільове використання), принципом дії (стаціонарні, мобільні, електрофізичні, побутові).
- **Позитивний вплив на якість:** Озонування не лише забезпечує знезараження, але й може позитивно впливати на посівні якості насіння (підвищення схожості, енергії проростання) та якість зерна при зберіганні.

- **Екологічна безпека:** Технологія озонування є екологічно безпечною, оскільки озон генерується з повітря на місці використання та швидко розкладається до кисню, не залишаючи шкідливих побічних продуктів.

Переваги технологій озонування насіння та зерна:

- Висока ефективність знезараження.
- Екологічна чистота та безпека.
- Покращення посівних якостей.
- Збільшення термінів зберігання.
- Можливість локального застосування.
- Універсальність застосування.
- Потенціал зниження енергоємності.

Недоліки та обмеження технологій озонування насіння та зерна:

- Необхідність контролю концентрації.
- Потенційна корозійна дія.
- Залежність ефективності від умов обробки.
- Нерівномірність обробки.
- Витрати на обладнання.
- Неповне розуміння механізмів впливу.

Шляхи подальшого розвитку технологій озонування насіння та зерна:

- Удосконалення обладнання.
- Оптимізація технологій обробки.
- Розробка комплексних систем.
- Створення мобільних та автономних рішень.
- Дослідження впливу на якісні характеристики.
- Розробка методів контролю якості обробки.
- Розширення сфери застосування.
- Зниження вартості обладнання.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Комплектування віброозонуючого пристрою для передпосівної обробки насіння

Застосування озонованого повітря для обробки насіння відкриває нові перспективи в сільському господарстві. Ця технологія є екологічно безпечною альтернативою традиційним хімічним методам знезараження насіннєвого матеріалу [7, 20]. Озонування не лише покращує умови праці, усуваючи контакт з токсичними речовинами [8, 20], але й сприяє збереженню довкілля [21]. Важливою перевагою є також збільшення терміну безпечного зберігання вологого насіння до його остаточної сушки [29]. Це особливо цінно при роботі з овочевими та баштанними культурами, де необхідно узгодити етапи збору, транспортування та сушіння. Крім того, озонована обробка є ефективним способом підготовки насіння безпосередньо перед сівбою [24].

Проблема зараженості насіння фітопатогенами полягає у присутності на його поверхні, всередині або між насінинами живих збудників хвороб. За сприятливих умов ці мікроорганізми можуть активно розвиватися, викликаючи захворювання як самого насіння та проростків, так і вже дорослих рослин. Для оцінки фітосанітарного стану насіння проводять лабораторні дослідження, спрямовані на виявлення грибкових та бактеріальних інфекцій, ідентифікацію видів патогенів та визначення ступеня їх поширення. Ключовим показником рівня зараженості є відсоткове співвідношення кількості інфікованих насінин до загальної кількості перевіреного насіння [5].

Вібраційна машина, що розглядається в цьому дослідженні, являє собою коливальну систему, яка може здійснювати рухи за двома незалежними напрямками, тобто має два ступені вільності (рис. 2.1). Її рух забезпечується приводом, який передає на вал 1 з несиметрично розташованою віссю обертання стабільний крутний момент.

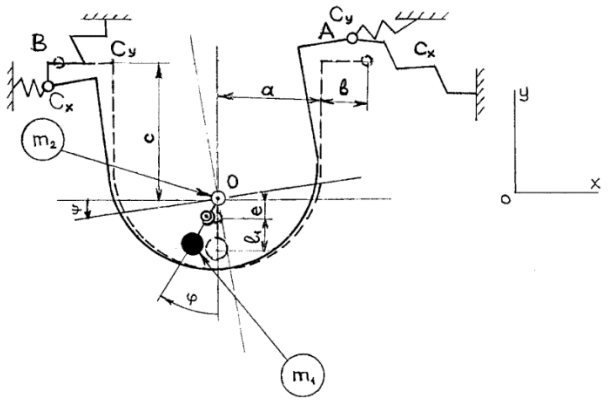


Рис. 2.1. Розрахункова схема вібраційної машини з кінематичним віброзбудженням [29]: а - принципова схема: Ілюструє основні елементи конструкції машини та спосіб передачі руху. б – ступені вільності системи: Схематично показує два незалежні напрямки руху, які може здійснювати система.

У процесі моделювання передбачається, що сила опору, яка виникає між ексцентриком і контейнером 2, прямо залежить від швидкості обертання ексцентрика. Для опису руху системи використовуються узагальнені координати: кут повороту ексцентрика позначено як φ, а кут повороту контейнера – як ψ.

$$\dot{\varphi} = \omega = const \tag{3.1}$$

$$\ddot{\varphi} = 0 \tag{3.2}$$

Кінетична енергія (T) установки визначається як сума кінетичних енергій ексцентрика (T_e) та контейнера (T_K):

$$T = T_e + T_K \tag{3.3}$$

де

$$T_e = \frac{1}{2} J_e \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_e (e^2 \dot{\varphi}^2) \tag{3.4}$$

$$T_K = \frac{1}{2} J_K \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} m_K (r_c^2 \dot{\psi}^2 + 2 e r_c \dot{\varphi} \dot{\psi} \cos(\varphi - \psi) + e^2 \dot{\varphi}^2) \tag{3.5}$$

Консервативні та неконсервативні складові узагальнених сил мають вигляд:

$$Q_{\varphi}^{(c)} = 0 \tag{3.6}$$

$$Q_{\psi}^{(c)} = -k\psi \tag{3.7}$$

Рівняння руху віброустановки записуються як:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i^{(c)} + Q_i^{(nc)} \tag{3.8}$$

Розв’язавши рівняння відносно вищих похідних, отримуємо:

$$\ddot{\psi} = \frac{-k\psi - b\dot{\psi} - m_K e r_c \dot{\varphi}^2 \sin(\varphi - \psi)}{J_K + m_K r_c^2} \tag{3.9}$$

Ввівши позначення $\dot{\varphi} = \omega$ та $\dot{\psi} = \Omega$, система набуває вигляду:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \omega \\ \dot{\psi} = \Omega \\ \dot{\Omega} = \frac{-k\psi - b\Omega - m_K e r_c \omega^2 \sin(\varphi - \psi)}{J_K + m_K r_c^2} \end{cases} \tag{3.10}$$

При дослідженні системи вводиться малий параметр ε, що дозволяє спростити аналіз руху.

Рівняння руху точки А віброплатформи:

$$m_A \ddot{z}_A + k_z z_A = F_0 \sin(\omega t) \tag{3.11}$$

Рівняння руху точки В:

$$m_B \ddot{z}_B + k_z z_B = F_0 \sin(\omega t) \tag{3.12}$$

Рівняння руху точки А при повороті віброплатформи на кут ϕ:

Характеристики вимушених коливань по осі z:

Період: $T = \frac{2\pi}{\omega}$

Частота: $f = \frac{\omega}{2\pi}$

Амплітуда: $A = \frac{F_0/k_z}{\sqrt{(1-(\omega/\omega_0)^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_0)^2}}$

Коефіцієнт динамічних зусиль: $\beta = \frac{A}{\delta_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{(1-(\omega/\omega_0)^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_0)^2}}$

Де $\omega_0 = \sqrt{k_z/m}$ – власна частота коливань, а статична деформація $\delta_{ст}=F_0/k_z$.

У випадку, коли ω>>ω0, коефіцієнт динамічних зусиль:

$$\beta \approx \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 \tag{3.13}$$

Описана вібраційна машина являє собою складну механічну систему, рух якої визначається взаємодією кількох елементів: ексцентрика (неврівноваженої обертової маси) та контейнера (в якому, ймовірно, знаходиться насіння для обробки).

Збудження коливань (рівняння 3.8 та 3.9):

- Обертання ексцентрика створює періодичну силу, що змушує всю систему, включаючи контейнер, здійснювати коливальний рух. Це явище називається *кінематичним віброзбудженням*.
- Перше рівняння руху (3.8) описує обертальний рух ексцентрика. Воно показує, що кутове прискорення ексцентрика (ϕ¨) залежить від прикладеного моменту приводу (M) та сили опору, пропорційної його кутовій швидкості (cϕ˙).
- Друге рівняння руху (3.8) вказує на те, що кутове прискорення контейнера (ψ¨) дорівнює нулю. Це спрощення може означати, що розглядається поступальний рух контейнера або що його обертання є незначним на даному етапі аналізу.

Характеристики коливань (рівняння 3.11 - 3.13):

- Рівняння (3.11) та (3.12) описують вимушені коливання окремих точок (A та B) віброплатформи (яка є частиною контейнера або пов'язана з ним) під дією зовнішньої періодичної сили F0sin(ωt). Тут mA та mB – маси цих точок, kz – коефіцієнт пружності елементів, що підтримують платформу, а ω – частота зовнішнього збудження.

- Рівняння (3.12) враховує додатковий вплив повороту віброплатформи на кут ϕ на рух точки А.
- Рівняння (3.13) визначають основні характеристики цих вимушених коливань:
    - Період (Т): час одного повного коливання.
    - Частота (f): кількість коливань за одиницю часу.
    - Амплітуда (А): максимальне відхилення від положення рівноваги. Амплітуда залежить від частоти зовнішнього збудження (ω) та власної частоти коливальної системи (ω0).
    - Коефіцієнт динамічних зусиль (β): показує, у скільки разів амплітуда вимушених коливань перевищує статичну деформацію (δст) під дією постійної сили F0. Цей коефіцієнт залежить від співвідношення частоти збудження та власної частоти.

Вплив коливань на озонування насіння (припущення):

Якщо припустити, що вібраційна машина використовується для обробки насіння озонованим повітрям, то процес коливання може мати наступний вплив:

1. **Покращення контакту насіння з озоном:** Вібрація може призводити до постійного перемішування насіння в контейнері. Це забезпечує більш рівномірний контакт кожної насінини з озонованим повітрям з усіх боків, що підвищує ефективність знезараження.
2. **Збільшення швидкості процесу:** Постійне перемішування може сприяти більш швидкому проникненню озону до поверхні насіння, скорочуючи час, необхідний для досягнення потрібного рівня обробки.
3. **Рівномірність обробки:** Завдяки вібрації зменшується ймовірність утворення зон з недостатньою концентрацією озону біля окремих насінин, що сприяє більш однорідній обробці всієї партії.

4. **Механічне очищення (потенційно):** Вібрація може також сприяти видаленню з поверхні насіння пилу, дрібних частинок ґрунту або спор грибків, що може підвищити ефективність дії озону.

Важливо зазначити: Для підтвердження цих припущень необхідні додаткові дослідження, які б безпосередньо вивчали вплив параметрів вібрації (частоти, амплітуди) на ефективність озонування насіння різних культур. Описана математична модель є першим кроком до розуміння динаміки вібраційної установки, і її можна використовувати для оптимізації параметрів вібрації з метою покращення процесу озонування.

2.2 Опис вібраційної установки для озонування насіння

Для проведення експериментів з обробки насіння озоном було використано спеціальну вібраційну установку. Її особливість полягає у здатності створювати для оброблюваного матеріалу стан, схожий на киплячий шар [26, 29].

Принцип роботи установки полягає в наступному: обертовий рух від електродвигуна передається на вібраційний привод. У цьому приводі обертаються незбалансовані маси, що генерує обертову силу. Під дією цієї сили контейнер з насінням починає інтенсивно коливатися у вертикальній площині з прискоренням, яке перевищує прискорення вільного падіння.

В результаті таких коливань сипучий матеріал (насіння) всередині контейнера приводиться в активний циркуляційний рух. Одночасно через спеціальне решітчасте дно-дифузор подається потік повітря, збагачений озоном, який створюється вентилятором. Така конструкція забезпечує рівномірні умови температури, вологості та розподілу повітря по всьому об’єму оброблюваного насіння [29].

Для дослідження ефективності знезараження насіння озоном вібраційну сушильну установку було герметизовано за допомогою перфорованого кожуха. Для його надійного кріплення було розроблено спеціальний металевий каркас, який з’єднувався безпосередньо зі станиною установки. Нижня частина

гермокожуха коливається разом з контейнером. Однак завдяки еластичності матеріалу кожуха у вертикальному та горизонтальному напрямках, його верхній отвір по периметру щільно з'єднано з нерухомою металевою панеллю. Це конструктивне рішення дозволило розмістити на цій нерухомій панелі всі необхідні елементи системи подачі озонованого повітря, а також прилади для вимірювання та автоматичного контролю параметрів процесу озонування (див. рис. 2.2).

Генерація озону відбувається у спеціальному реакторі бар'єрного типу [10, 35]. Цей реактор являє собою скляний циліндр, на зовнішній поверхні якого симетрично розташовані високовольтні електроди у вигляді концентричних смуг. Усередині циліндра по всій його внутрішній поверхні розміщено пасивний електрод, виготовлений з тонкого металу. Поверхня цього електрода має гострі виступи (шпичаки), які сприяють концентрації електричного поля та інтенсивному виникненню електричних розрядів, що призводить до активного утворення озону. Для забезпечення електричної ізоляції та механічної міцності скляна труба з електродами поміщена в циліндричний кожух з фторопласту. У вхідний отвір цього кожуха встановлено вентилятор для подачі повітря. Вихідний отвір камери генератора за допомогою спеціального з'єднання під'єднано до системи подачі активованого повітря, що дозволяє спрямовувати потік озонованого повітря безпосередньо в зону обробки насіння.

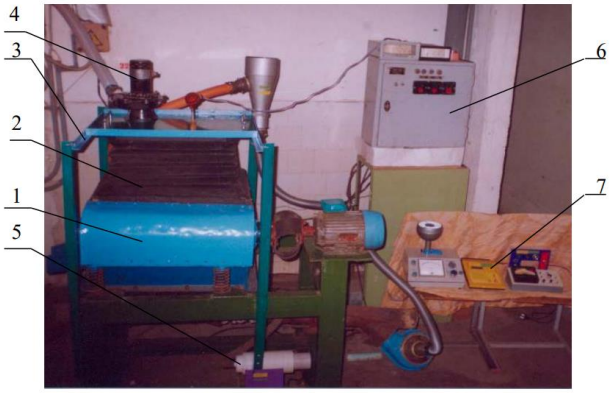


Рис. 2.2 Технічне забезпечення досліджень знезаражуючої дії озону [29]: 1. Вібраційна установка; 2. Перфорований гермокожух; 3. Металевий каркас з панеллю; 4. Система подачі озонованого повітря; 5. Генератор озону з реактором

бар’єрного типу; 6. Блок керування; 7. Пристрої вимірювання та автоматичного регулювання параметрів процесу

2.3 Вплив передпосівної обробки насіння озоном на ріст, розвиток та врожайність

Капуста Пак-Чой (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) є цінною листовою овочевою культурою, що характеризується швидким періодом вегетації та високим вмістом вітамінів і мінеральних речовин. З метою підвищення її продуктивності, особливо для отримання надранньої продукції та покращення якості насіння, було проведено експериментальне дослідження впливу передпосівної обробки насіння озонованим повітрям [23, 24, 27].

Методика та умови дослідження:

Дослідження проводили в ґрунтово-кліматичних умовах Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Уманського НУ. Ґрунт дослідної ділянки – сірий лісовий, середньосуглинковий. Капусту сорту Пак-Чой вирощували прямим посівом насіння в ґрунт за схемою 45х25 см (88,8 тис. рослин/га) у першій декаді квітня. Дослід складався з двох варіантів: насіння, оброблене озоном протягом 10 хвилин, та контрольне (необроблене) насіння. Дослід проводили у чотириразовій повторності на облікових ділянках площею 0,05 м².

Протягом вегетації проводили фенологічні спостереження (терміни появи сходів, листків, утворення розетки, технічної стиглості) та біометричні вимірювання (висота рослин, діаметр розетки, кількість та площа листків, товщина стебла) на 10 маркованих рослинах з кожної облікової ділянки.

Результати дослідження:

Аналіз фенологічних спостережень показав, що озонована обробка насіння Пак-Чой стимулювала більш ранній початок та масову появу сходів (на 1 та 3 дні відповідно), а також прискорила настання фаз появи першого, третього та п’ятого справжніх листків (на 1-4 дні раніше порівняно з контролем). Міжфазні періоди розвитку у рослин з озонованого насіння були коротшими.

Біометричні вимірювання свідчили про більш інтенсивний ріст та розвиток рослин, вирощених з озонованого насіння, протягом усього періоду дослідження (з квітня по травень). У фазах 4-х, 6-ти листків та розетки рослини з озонованого насіння мали більшу висоту (на 0,7-2,6 см), товщину стебла (на 0,2-2,4 см) та площу листків (до 0,1 тис. м²/га) порівняно з контрольними зразками. У фазі технічної стиглості висота озонованих рослин також перевищувала контроль на 3 см.

Урожайність рослин, насіння яких було оброблене озоном, була значно вищою (12,3 т/га) порівняно з контролем (9,2 т/га), що становить прибавку в 3,1 т/га. Крім того, насіння, отримане від рослин, вирощених з озонованого насіння, мало більшу масу 1000 насінин (1,6 г проти 1,4 г у контролі), більший діаметр головок (на 0,3 см) та більшу масу головок (на 11,1 г). Відповідно, урожайність насіння в озонованому варіанті була вищою на 1,4 ц/га.

Висновки:

Проведені дослідження довели позитивний вплив передпосівної обробки насіння капусти китайської Пак-Чой озонованим повітрям на настання та тривалість фенологічних фаз, біометричні показники рослин та, головне, на їх врожайність [24, 27, 36]. Найвищу врожайність було отримано при схемі посіву 45х25 см з використанням насіння, обробленого озоном (12,3 т/га), що забезпечує істотну прибавку врожаю. Озонова обробка також покращила якісні характеристики насіння наступного покоління. Отримані результати підтверджують перспективність застосування озону для підвищення продуктивності та покращення якості продукції капусти Пак-Чой в умовах Правобережного Лісостепу України [7, 25].

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Ефективна охорона праці потребує плану організаційно-технічних заходів, що базується на прогнозуванні та відповідає законодавству України (Конституція України [11], Закон України "Про охорону праці" [37], Кодекс законів про працю України [12], Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП) [28]). Прогнозування майбутніх тенденцій травматизму, захворювань та умов праці є основою для розробки планів, спрямованих на виконання правових норм та створення безпечного робочого середовища [13].

4.1 Характеристика та аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації машини для озонування зерна

Вплив виробничих факторів є ключовим аспектом охорони праці, що охоплює ідентифікацію, аналіз та мінімізацію шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ) для забезпечення безпечного робочого середовища та зниження ризику професійних захворювань (відповідно до Закону України "Про охорону праці" [13, 37]). Розглянемо основні ШНВФ, які можуть виникати під час експлуатації машини для озонування зерна:

Електрична небезпека:

Характеристика: Становить значний ризик ураження електричним струмом при контакті з електрообладнанням машини, включаючи електродвигуни, генератор озону, блок керування та вимірювальні прилади (що регулюється Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів [НПАОП 40.1-1.21-98] [28]).

Аналіз: Ураження може бути спричинене порушенням ізоляції струмопровідних частин, несправністю системи заземлення або випадковим прямим контактом з елементами, що перебувають під напругою. Наслідки можуть варіюватися від легких опіків до фібриляції серця та смерті.

Механічна небезпека:

Характеристика: Ризик травмування працівників рухомими частинами машини, такими як вібраційний привод та вентилятори (що вимагає вжиття заходів безпеки згідно з Законом України "Про охорону праці" [37).

Аналіз: Існує небезпека затягування одягу, волосся або потрапляння кінцівок у зони обертання або зворотно-поступального руху під час обслуговування, чищення або випадкового наближення до неогороджених елементів. Це може призвести до защемлень, ударів, порізів та інших травм.

Шум та вібрація:

Характеристика: Підвищений рівень шуму, що генерується працюючими механізмами (вібраційний привод, вентилятори), та вібрація, що передається на робоче місце (гранично допустимі рівні встановлюються Державними санітарними нормами виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [ДСН 3.3.6.037-99] [28] та Державними санітарними нормами виробничої загальної та локальної вібрації [ДСН 3.3.6.039-99] [28]).

Аналіз: Тривалий вплив шуму може призвести до поступової втрати слуху, нервового перенапруження та порушень сну. Вібрація може негативно впливати на нервову, серцево-судинну та опорно-рухову системи, спричиняючи вібраційну хворобу.

Небезпека, пов'язана з озоном:

Характеристика: Ризик впливу підвищеної концентрації озону, який є токсичним газом, що утворюється в процесі роботи машини (гранично допустимі концентрації регулюються відповідними санітарними нормами [28]).

Аналіз: Навіть при низьких концентраціях озон може викликати подразнення слизових оболонок очей та дихальних шляхів, кашель, головний біль та нудоту. При перевищенні допустимих концентрацій можливі серйозніші ураження легень та інші негативні наслідки для здоров'я. Ймовірними джерелами витоку озону є негерметичність системи подачі, реактора синтезу озону та робочої камери.

Пиловиділення:

Характеристика: Утворення та розповсюдження пилу зерна під час процесів завантаження, вивантаження та безпосередньої обробки в машині (що вимагає контролю згідно з санітарними нормами [13, 28]).

Аналіз: Вдихання пилу зерна може призвести до подразнення слизових оболонок дихальних шляхів, розвитку алергічних реакцій та професійних захворювань легень, таких як пневмоконіоз.

Небезпека падіння:

Характеристика: Можливість падіння працівників при виконанні робіт з обслуговування високих частин машини або при переміщенні по слизьких чи нерівних поверхнях у зоні її розташування (що вимагає вжиття заходів безпеки згідно з Законом України "Про охорону праці" [37]).

Аналіз: Падіння можуть призвести до травм різного ступеня тяжкості, включаючи забої, вивихи та переломи.

Пожежна небезпека:

Характеристика: Ризик виникнення пожежі внаслідок несправності електрообладнання (коротке замикання, перегрів) або накопичення горючого пилу зерна на гарячих поверхнях (що регулюється Правилами пожежної безпеки в Україні [НАПБ А.01.001-2014] [28]).

Аналіз: Пожежа може призвести до пошкодження обладнання, травмування працівників та значних матеріальних збитків.

Детальний аналіз цих небезпечних та шкідливих факторів є необхідною основою для розробки ефективних організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних та здорових умов праці при експлуатації машини для озонування зерна (відповідно до статті 13 Закону України "Про охорону праці" [13, 37]).

4.2 Розробка організаційно-технічних заходів щодо забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці на машині для озонування зерна

З метою усунення або мінімізації виявлених небезпечних та шкідливих факторів, що виникають під час експлуатації машини для озонування зерна, пропонується комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на створення безпечних і здорових умов праці (відповідно до Закону України "Про охорону праці" [37]).

Організаційні заходи:

Ці заходи спрямовані на регламентацію безпечного виконання робіт, навчання персоналу та контроль за дотриманням встановлених вимог.

Розробка інструкцій з охорони праці: Створення детальних, чітких та зрозумілих інструкцій з охорони праці для кожного виду робіт, пов'язаних з експлуатацією, обслуговуванням (щоденним, періодичним), ремонтом та транспортуванням машини для озонування зерна (відповідно до Положення про розробку інструкцій з охорони праці [НПАОП 0.00-4.15-98] [28]). Інструкції повинні враховувати специфіку обладнання та потенційні ризики на кожному етапі.

Навчання та інструктаж персоналу: Організація та проведення обов'язкових первинного (перед допуском до самостійної роботи), повторного (періодично), позапланового (при зміні технологічного процесу або обладнання) та цільового (перед виконанням робіт підвищеної небезпеки) інструктажів з питань охорони праці (відповідно до Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці [НПАОП 0.00-4.12-05] [28]). Навчання повинно включати теоретичні знання та практичні навички безпечного виконання робіт.

Допуск до роботи: Забезпечення допуску до самостійної роботи на машині для озонування зерна лише працівників, які пройшли відповідне навчання, інструктаж, перевірку знань з питань охорони праці та обов'язковий

попередній і періодичні медичні огляди відповідно до чинного законодавства (відповідно до Порядку проведення обов'язкових попередніх та періодичних психіатричних оглядів [Постанова КМУ від 27.09.2000 № 1465] та Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій [Наказ МОЗ України від 21.05.2007 № 246] [28]).

Режим праці та відпочинку: Встановлення оптимальних режимів праці та відпочинку, що враховують тривалість робочого дня (зміни), перерви для відпочинку та харчування, а також обмеження часу роботи в умовах впливу шкідливих факторів (шум, вібрація, озон, пил) відповідно до гігієнічних нормативів (відповідно до Кодексу законів про працю України [12] та Державних санітарних норм виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [ДСН 3.3.6.037-99], Державних санітарних норм виробничої загальної та локальної вібрації [ДСН 3.3.6.039-99], Державних санітарних правил і норм "Гігієнічні нормативи вмісту забруднюючих речовин в повітрі робочої зони" [ДСН 3.3.6.042-99] [28]).

Система нарядів-допусків: Запровадження системи нарядів-допусків для виконання робіт підвищеної небезпеки, таких як ремонт електрообладнання, обслуговування рухомих частин без огороджень, роботи на висоті тощо (відповідно до Типового положення про порядок виконання робіт підвищеної небезпеки [НПАОП 0.00-4.05-03] [28]). Наряд-допуск визначає безпечні умови виконання робіт, відповідальних осіб та необхідні заходи безпеки.

Контроль за дотриманням вимог охорони праці: Організація багаторівневої системи контролю за дотриманням працівниками вимог інструкцій з охорони праці, правил внутрішнього трудового розпорядку та інших нормативних документів з охорони праці з боку керівників усіх рівнів та служби охорони праці підприємства (відповідно до статті 13 Закону України "Про охорону праці" [37]).

Забезпечення засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): Безоплатне забезпечення працівників сертифікованими ЗІЗ відповідно до діючих норм та характеру виконуваних робіт (відповідно до Положення про порядок забезпечення працівників засобами індивідуального захисту [НПАОП 0.00-4.01-

08] [28]). Це включає респіратори (для захисту органів дихання від пилу та озону), навушники або протишумові вкладиші (для захисту органів слуху), захисні окуляри (для захисту очей), спецодяг та спецвзуття (для захисту від загальних виробничих забруднень та механічних впливів), діелектричні рукавички та взуття (при роботі з електрообладнанням). Організація контролю за правильним застосуванням ЗІЗ працівниками.

Технічні заходи:

Ці заходи спрямовані на усунення небезпечних факторів безпосередньо на робочих місцях або зниження рівня їх впливу до безпечних значень.

Заземлення та занулення електрообладнання: Виконання надійного захисного заземлення та занулення (для систем з глухозаземленою нейтраллю) всіх металевих неструмопровідних частин корпусу машини, які можуть опинитися під напругою у разі пошкодження ізоляції (відповідно до Правил улаштування електроустановок [ПУЕ] [28]). Регулярна перевірка стану контуру заземлення.

Огородження рухомих частин: Встановлення суцільних або сітчастих захисних огороджень на всіх обертових та рухомих елементах машини, таких як вібраційний привод, приводні паси, вентилятори, з метою запобігання випадковому контакту працівників з ними (відповідно до Загальних вимог щодо забезпечення роботодавцем охорони праці працівників [НПАОП 0.00-7.17-18] [28]). Огородження повинні бути надійно закріплені та мати блокувальні пристрої, що виключають можливість доступу до небезпечних зон під час роботи обладнання.

Система вентиляції: Облаштування ефективної загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції в робочому приміщенні для забезпечення нормованого повітрообміну та видалення пилу та можливих низьких концентрацій озону (відповідно до Державних будівельних норм ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування" [13, 28] та Санітарних норм і правил "Санітарні вимоги до повітря робочої зони" [ДСанПіН 3.3.5.038-99] [28]).

Додатково рекомендується використання місцевих відсмоктувачів безпосередньо в місцях завантаження та вивантаження зерна для ефективного видалення пилу.

Контроль концентрації озону: Встановлення стаціонарної або переносних систем безперервного контролю концентрації озону в повітрі робочої зони з автоматичною сигналізацією (звуковою та світловою) про перевищення встановлених гранично допустимих концентрацій (ГДК) (відповідно до Державних санітарних правил і норм "Гігієнічні нормативи вмісту забруднюючих речовин в повітрі робочої зони" [ДСН 3.3.6.042-99] [28]). Регулярне калібрування контрольних приладів.

Герметизація обладнання: Забезпечення високого рівня герметичності реактора синтезу озону, трубопроводів системи подачі озонованого повітря та робочої камери для мінімізації витоків озону в робочу зону. Регулярна перевірка герметичності з'єднань та елементів обладнання.

Амортизація вібрації: Встановлення віброізолюючих елементів (гумові прокладки, пружинні амортизатори) між вібруючими частинами машини та несучими конструкціями для зменшення рівня вібрації, що передається на робоче місце та сусіднє обладнання (відповідно до Державних санітарних норм виробничої загальної та локальної вібрації [ДСН 3.3.6.039-99] [28]).

Забезпечення належного освітлення: Підтримання рівномірного та достатнього рівня освітленості робочих місць відповідно до діючих будівельних норм та правил (відповідно до Державних будівельних норм ДБН В.2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення" [28]). Забезпечення як загального, так і місцевого освітлення небезпечних зон та місць виконання точних робіт. Регулярна перевірка та очищення світильників.

Протипожежні заходи: Забезпечення робочої зони первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники відповідного типу та кількості), встановлення знаків пожежної безпеки, розробка планів евакуації на випадок пожежі та проведення протипожежних інструктажів з персоналом (відповідно до Правил пожежної безпеки в Україні [НАПБ А.01.001-2014] [28]).

Регулярне технічне обслуговування: Запровадження системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР) та регулярного технічного обслуговування машини згідно з регламентом виробника. Своєчасне виявлення та усунення несправностей, зношених деталей та елементів, що можуть створювати небезпеку.

Впровадження та неухильне дотримання запропонованих організаційно-технічних заходів є необхідною умовою для забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці та запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням при експлуатації машини для озонування зерна (відповідно до статті 13 Закону України "Про охорону праці" [37]).

3.3 Моделювання небезпечних ситуацій під час роботи з машиною для озонування зерна

Для забезпечення безпеки праці важливо не лише ідентифікувати потенційні небезпечні та шкідливі фактори, але й передбачити можливі небезпечні ситуації, які можуть виникнути під час експлуатації машини для озонування зерна. Розуміння механізмів формування таких ситуацій дозволяє розробити ефективні превентивні заходи та алгоритми дій у разі їх виникнення [13].

Травма, як порушення цілісності організму або його функцій, є наслідком дії небезпечного фактора. У людино-машинних системах, до яких належить і машина для озонування зерна, травми, аварії та катастрофи мають спільні корені та механізми розвитку.

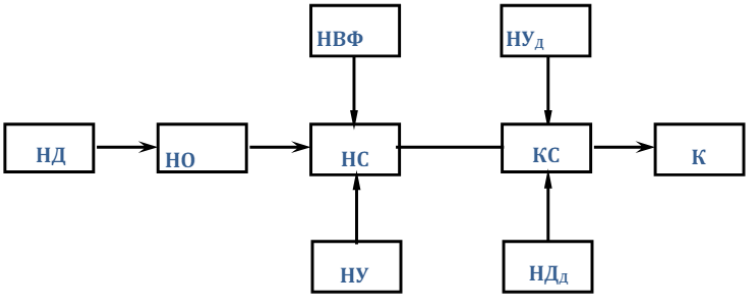


Рис. 3.1 Блок-схема формування небезпечних ситуацій

На рисунку 3.1 представлена блок-схема, що ілюструє послідовність формування травмонебезпечних, аварійних та катастрофічних ситуацій у виробничому процесі. Ключовими елементами цієї схеми є:

НВФ (Небезпечний виробничий чинник): Це потенційне джерело шкоди (наприклад, електричний струм, рухомі частини, озон).

НУ (Небезпечні умови): Обставини виробничого середовища, які підвищують ймовірність реалізації небезпечного чинника (наприклад, пошкоджена ізоляція, відсутність огороджень).

НД (Небезпечні дії): Неправильні або необережні дії працівника, що можуть призвести до небезпечної ситуації (наприклад, порушення інструкцій, робота без ЗІЗ).

НО (Небезпечні обставини): Сукупність факторів, що сприяють виникненню небезпечної ситуації (наприклад, комбінація небезпечних умов та небезпечних дій).

НС (Небезпечна ситуація): Ситуація, при якій існує реальна загроза завдання шкоди (наприклад, коротке замикання, потрапляння руки в рухомий механізм).

А (Аварія): Небезпечна подія, що призвела до пошкодження обладнання, матеріальних збитків або порушення виробничого процесу.

Т (Травма): Пошкодження здоров'я працівника внаслідок дії небезпечного фактора.

КС (Критична ситуація): Ситуація, що загрожує життю та здоров'ю великої кількості людей або призводить до значних матеріальних чи екологічних збитків.

НУд (Небезпечні умови додатково) та НДд (Небезпечні дії додатково): Фактори, що ускладнюють критичну ситуацію та можуть призвести до катастрофи.

К (Катастрофа): Масштабна аварія з тяжкими наслідками для людей, навколишнього середовища та економіки.

Важливо розуміти, що всі елементи, які формують небезпечну ситуацію, мають певну ймовірність виникнення. Це означає, що небезпечні умови, небезпечні дії, небезпечні ситуації та їхні наслідки (аварії, травми) є випадковими явищами [25]. Тому метою моделювання є не лише передбачення можливих небезпечних ситуацій, але й оцінка ймовірності їх виникнення та потенційних наслідків для розробки ефективних заходів щодо їх запобігання та мінімізації.

Висновки до розділу

Проведений аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що можуть виникати під час експлуатації машини для озонування зерна, виявив ряд потенційних ризиків, серед яких особливу увагу слід приділити електричній [28] та механічній небезпеці [37], впливу шуму та вібрації [28], а також ризикам, пов'язаним з токсичністю озону [28] та пиловиділенням [28].

Розроблений комплекс організаційно-технічних заходів, що включає навчання персоналу [28], забезпечення засобами індивідуального захисту [28], технічне обслуговування обладнання, встановлення захисних огороджень [28] та системи вентиляції [4], а також контроль концентрації озону [4], є необхідним для забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці та мінімізації виявлених ризиків (відповідно до Закону України "Про охорону праці" [37]).

Моделювання можливих небезпечних ситуацій дозволило розробити чіткі алгоритми дій персоналу у випадку виникнення нештатних ситуацій, що є важливим елементом запобігання аваріям та зменшення їх потенційних наслідків.

Для підтримання високого рівня безпеки праці рекомендується здійснювати регулярний контроль за умовами праці та дотриманням вимог охорони праці [37], а також періодично переглядати та вдосконалювати розроблені заходи з урахуванням виробничого досвіду та нових нормативних вимог.

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЯГНУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У цьому розділі представлено обґрунтування технологічного, технічного, економічного та екологічного значення результатів проведених досліджень з передпосівної обробки насіння капусти Пак-Чой озонованим повітрям для сфери сільського господарства.

Результати проведених досліджень демонструють значний технологічний потенціал застосування озону для передпосівної обробки насіння капусти Пак-Чой (див. підрозділ 2.3). Встановлено, що озонування протягом 10 хвилин стимулює проростання насіння, прискорює появу сходів та початковий ріст рослин. Це особливо цінно для отримання надранньої продукції, оскільки скорочення періоду від посіву до збору врожаю на кілька днів може забезпечити вихід на ринок у більш вигідний час.

Крім того, озонова обробка виявила знезаражувальну дію (див. підрозділ 2.1), що може зменшити потребу у використанні хімічних протруйників насіння. Це відкриває перспективи для розвитку більш екологічно чистих технологій вирощування овочевих культур.

Розроблена та використана в дослідженні вібраційна установка з герметизованим контуром подачі озонованого повітря є технічно обґрунтованим рішенням для забезпечення ефективної та контрольованої обробки насіння (див. підрозділ 2.2). Застосування вібрації сприяє рівномірному контакту насіння з озоном, а герметизація мінімізує витік озону в робоче середовище, забезпечуючи безпеку персоналу (див. розділ 4).

Отримані дані щодо оптимальних параметрів озонування (тривалість обробки, концентрація озону, параметри вібрації) є цінними для проектування та вдосконалення промислових установок для передпосівної обробки насіння (див. підрозділи 2.2 та 2.3).

Встановлене значне підвищення врожайності капусти Пак-Чой (на 3,1 т/га або близько 33,7% порівняно з контролем) внаслідок передпосівної обробки насіння озоном має пряме економічне значення для сільськогосподарських

виробників (див. підрозділ 2.3). Збільшення обсягу продукції з одиниці площі призводить до зростання прибутковості.

Крім того, покращення якості насіння (збільшення маси 1000 насінин) може позитивно вплинути на посівні якості майбутніх врожаїв та зменшити витрати на насіннєвий матеріал у довгостроковій перспективі (див. підрозділ 2.3). Зниження потреби у хімічних протруйниках також може призвести до зменшення витрат на засоби захисту рослин (див. підрозділ 1.1 та 2.3).

Застосування озону як знезаражувального агента є екологічно більш прийнятним порівняно з традиційними хімічними методами (див. підрозділ 1.1). Озон швидко розкладається на кисень і не залишає шкідливих залишків у насінні, ґрунті чи кінцевій продукції. Це сприяє виробництву екологічно чистих овочів та зменшує негативний вплив сільського господарства на навколишнє середовище.

Використання герметизованої вібраційної установки мінімізує викиди озону в атмосферу, що також є важливим аспектом екологічної безпеки технології (див. розділ 4).

Висновок:

Результати проведених досліджень переконливо обґрунтовують технологічну доцільність, технічну можливість, економічну вигідність та екологічну перевагу застосування передпосівної обробки насіння капусти Пак-Чой озонованим повітрям. Впровадження цієї технології в сільськогосподарське виробництво може сприяти підвищенню врожайності, покращенню якості продукції, зниженню витрат та зменшенню негативного впливу на довкілля, що є важливим для сталого розвитку аграрного сектору.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведений огляд наукових джерел та експериментальні дослідження щодо застосування озону в аграрній сфері виявили значні перспективи цієї екологічно чистої технології (див. розділ 1). Аналіз літератури засвідчив ефективність озону в знезараженні насіннєвого матеріалу, стимуляції росту рослин та покращенні якісних характеристик сільськогосподарської продукції, підкреслюючи необхідність подальших наукових розробок для оптимізації його використання (див. підрозділ 1.1).

Розглядаючи питання охорони праці при експлуатації обладнання для озонування (див. розділ 3), було ідентифіковано ключові небезпечні фактори (див. підрозділ 3.1) та запропоновано комплекс заходів для мінімізації ризиків (див. підрозділ 3.2), наголошуючи на важливості навчання персоналу, застосування засобів індивідуального захисту та впровадження технічних рішень для забезпечення безпечних умов праці.

Експериментально доведено ефективність озону в знезараженні насіння (див. підрозділ 2.1) та його позитивний вплив на продуктивність капусти китайської (Пак-Чой) (див. підрозділ 2.3), що виявилося у значному підвищенні врожайності. Ці результати обґрунтовують технологічну доцільність та економічну привабливість використання озону в сільському господарстві (див. розділ 4), підкреслюючи його екологічні переваги порівняно з традиційними хімічними методами (див. підрозділ 1.1 та розділ 4).

Застосування озону є перспективним напрямом в сільському господарстві, що поєднує ефективне знезараження, стимуляцію росту та підвищення врожайності з екологічною безпекою. Подальші дослідження, спрямовані на вдосконалення технологій та обладнання для озонування (див. підрозділ 2.2), сприятимуть його ширшому впровадженню, забезпечуючи сталий розвиток аграрного сектору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авдєєва, В., та ін. (2018). Influence of ozone on germination and germinating energy of winter wheat seeds. *Engineering for Rural Development, 23,* 25. URL: https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N128.pdf (дата звернення: 1.05.2025).
2. Амоа, Б. А., & Махруф, Р. М. (2018). Susceptibility of the life stages of cigarette beetle, *Lasioderma serricorne* (F.) (Coleoptera: Anobiidae) to ozone. *Journal of Stored Products Research, 78,* 11-17. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.05.009
3. Амоа, Б. А., & Махруф, Р. М. (2019). Ozone as a Potential Fumigant Alternative for the Management of *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) in Wheat. *Journal of Economic Entomology*, *112*(4), 1953–1963. https://doi.org/10.1093/jee/toz071
4. Армітейдж, Д. М., Коган, П. М., & Вілкін, Д. Р. (1994). Integrated pest management in stored grain: Combining surface insecticide treatments with aeration. *Journal of Stored Products Research*, *30*(4), 303-319. https://doi.org/10.1016/S0022-474X(94)90322-0
5. Бапаті, Б., Раджан, А., & Радхакрішнан, М. (2021). Ozone: An Alternative Fumigant in Controlling the Stored Product Insects and Pests: A Status Report. *Ozone: Science & Engineering*, *44*(1), 79–95. https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1933899
6. Бапаті, Б., Раджан, А., & Радхакрішнан, М. (2022). Ozone: An Alternative Fumigant in Controlling the Stored Product Insects and Pests: A Status Report. *Ozone Science & Engineering, 44,* 79–95.
7. Ван, І., Цяо, С. Ц., & Ван, Ч.-Б. (2022). Applications of ozone treatment in agriculture and food industry. A review. [Застосування озонової обробки в сільському господарстві та харчовій промисловості. Огляд]. URL: https://api.inmateh.eu/public/uploads/68-86-N488-Ying-WANG74a2e024-df1c-41a7-9534-baade291b34f.pdf (дата звернення: 1.05.2025).
8. Гавриленко, Р. Д. (2024). *Удосконалення процесу передпосівної обробки насіння озоном*.

9. Гозе, П., Разі, Л., Посс, А., Оссенак, Т. (2016). Starch characterization after ozone treatment of wheat grains. *Journal of Cereal Science, 70,* 207-213. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.007
10. Інегно, Б. Л., & Тавелла, Л. (2022). Ozone gas treatment against three main pests of stored products by combination of different application parameters. *Journal of Stored Products Research, 95,* 101902. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101902
11. Конституція України від 28 червня 1996 року № 254к/96-ВР. URL: [чинна редакція на поточний момент].
12. Кодекс законів про працю України від 10 грудня 1971 року № 322-VIII. URL: [чинна редакція на поточний момент].
13. Костенко, Є. Я., та ін. (2025). *Охорона праці в галузі. Безпека життєдіяльності. Цивільний захист*. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/71763/3/%D0%9E%D1%85%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B0%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf (дата звернення: 1.05.2025).
14. Леміч, Д., Джембрек, Д., Бажок, Р., & Паяч Живкович, І. (2019). Ozone Effectiveness on Wheat Weevil Suppression: Preliminary Research. *Insects, 10*(10), 357. https://doi.org/10.3390/insects10100357
15. Ленntек. (n.d.). *Ozone*. Available online: https://www.lenntech.com/ozone.htm (дата звернення: 1.05.2025).
16. Магруф, Р. М., & Паудел, С. (2021). Dose-response of selected stored product insects to ozone treated on various surface materials. *Proceedings of the 11th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*. Manitoba, Canada.
17. Матлок, Н., Пєхов'як, Т., & Балавейдер, М. (2020). Effects of Ozone Treatment on Microbial Status and the Contents of Selected Bioactive Compounds in *Origanum majorana* L. *Plants*, *9*(12), 1637 (дата звернення: 1.05.2025).
18. Матлок, Н., Пєхов'як, Т., & Балавейдер, М. (2021). Effect of Ozone Treatment on the Quality of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.). *Plants*, *10*(5), 847.

19. Матлок, Н., Пєхов'як, Т., & Балавейдер, М. (2024). Modification of Fungicide Treatment Needs and Antioxidant Content as a Result of Real-Time Ozonation of Raspberry Plants. *Molecules*, *29*(16), 3949. https://doi.org/10.3390/molecules29163949

20. Матлок, Н., Пєхов'як, Т., Горзеляни, Й., & Балавейдер, М. (2020). Effect of Ozone Fumigation on Physiological Processes and Bioactive Compounds of Red-Veined Sorrel (*Rumex sanguineus* ssp. *sanguineus*). *Agronomy*, *10*(11), 1726.

21. Макдонох, М. Х., Мейсон, Л. Дж., & Волошук, Ч. П. (2011). Susceptibility of stored product insects to high concentrations of ozone at different exposure intervals. *Journal of Stored Products Research*, *47*(4), 306-310. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.04.003

22. Мельник, О. В., та ін. (2021). Застосування озону для після збиральної обробки часнику озимого: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. *The 2nd International scientific and practical conference "Results of modern scientific research and development"*, 640 p. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/36086/1/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%20%D0%9C%D0%B0%D0%B4%D1%80%D1%96%D0%B4%2C%20%D0%86%D1%81%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D1%96%D1%8F%202-4%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D1%8F%202021%20%D1%80..pdf#page=16 (дата звернення: 1.05.2025).

23. Мсайлєб, Н. (2015). *Ozone as a Safer and Greener Alternative to Pesticides*. Available online: https://theglobalscientist.com/2015/01/07/ozone-as-a-safer-and-greener-alternative-to-pesticides/ (дата звернення: 1.05.2025).

24. HASA. (n.d.). *Ozone*. Available online: https://www.nasa.gov/ozone (дата звернення: 1.05.2025).

25. Наяк, М. К., Дагліш, Г. Дж., Філліпс, Т. В., & Еберт, П. Р. (2020). Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: A global perspective. *Annual Review of Entomology*, *65*, 333–350 (дата звернення: 1.05.2025).

26. Озон. (n.d.). Available online: https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution (дата звернення: 1.05.2025).

27. Парпієв, М. П., та ін. (2023). Influence of ozone treatment on the sowing qualities of spring barley seeds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1142*(1), 012016. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1142/1/012016

28. Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП) [перелік конкретних чинних НПАОП, що стосуються вашої галузі або теми дослідження].

29. Походай, М. В. (2018). *Обгрунтування параметрів обладнання для передпосівної обробки насіння овочевих культур*.

30. Редді, С. В. Р., Рао, Д. В. С., Шарма, Р. Р., Пріті, П., & Пандісельвам, Р. (2021). Role of Ozone in Post-Harvest Disinfection and Processing of Horticultural Crops: A Review. *Ozone: Science & Engineering*, *44*(1), 127–146. https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1994367

31. Сафонова, О. М., та ін. (2011). Дослідження впливу озоно-повітряної суміші на процес пророщення зерна пшениці. *Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]*, *40*(1), 50-53.

32. Сіваранджані, С., Арун Прасатх, В., Пандісельвам, Р., Котхакота, А., & Ханега, А. М. (2021). Recent advances in applications of ozone in the cereal industry. *LWT*, *146*, 111412. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111412

33. Сілва, М. В. А., Фароні, Л. Р. А., Соуса, А. Г., Пратес, Л. Г. Ф., & Абреу, А. О. (2019). Kinetics of the ozone gas reaction in popcorn kernels. *Journal of Stored Products Research*, *83*, 168-175. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.06.014

34. Страуміте, Е., Руцінш, А., Віестурс, Д., Клеперіс, Й., & Крістінш, А. (2021). Evaluation of ozone influence on wheat grain quality during active drying. *Agronomy Research*, *19*(S3), 1308–1317. URL: https://dspace.emu.ee/server/api/core/bitstreams/52350900-e0c8-4795-904c-606777c8b438/content (дата звернення: 1.05.2025).

35. Четінкая, Н., Пазарлар, С., & Пайлан, І. К. (2022). Ozone treatment inactivates common bacteria and fungi associated with selected crop seeds and ornamental bulbs.

Saudi Journal of Biological Sciences, *29*(12), 103480. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103480

36. Шінгала, А. М. (2023). *OZONE APPLICATION IN WHEAT STORAGE 3648* (Дисертація, JAU JUNAGADH). URL: https://krishikosh.egranth.ac.in/handle/1/5810203575 (дата звернення: 1.05.2025).

37. Закон України "Про охорону праці" від 14 жовтня 1992 року № 2694-XII. URL: [чинна редакція на поточний момент]

ДОДАТКИ