МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Оцінка експлуатаційного зношення полімерних щілинних розпилювачів штангових обприскувачів та його вплив на рівномірність розподілу робочої рідини»

Виконав: студент 4 курсу, групи 42-ім
освітньої програми __бакалавра_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»__
Іван НОВІЦЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

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

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії
Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

НОВІЦЬКОМУ Івану Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оцінка експлуатаційного зношення полімерних щілинних розпилювачів штангових обприскувачів та його вплив на рівномірність розподілу робочої рідини»
керівник роботи Лісовий І.О., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 08 " травня 2026 р. № 01-06/167
2. Строк подання студентом роботи 20.05.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: Спеціалізована література з теорії гідроабразивного зношування полімерів; результати стендових випробувань систем генерації крапель; дані CFD-моделювання дисперсії аерозолів; нормативно-технічна документація щодо безпеки (ISO/ДСТУ); характеристики конструкційних поліацеталей (POM) та протоколи оцінки екологічної безпеки хімічного захисту.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ; сучасний стан та теоретичне обґрунтування проблеми деградації робочих органів обприскувачів; методика та результати лабораторних випробувань ресурсу полімерних елементів розпилення; виробнича безпека та запобігання надзвичайним ситуаціям при хімічному захисті рослин (реалізація концепції безпечного обслуговування); техніко-економічна та екологічна оцінка впровадження предиктивних критеріїв вибракування розпилювачів; загальні висновки; список використаних джерел; додатки.
5. Ілюстративний матеріал: 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	Едуард ПРОКОПЕНКО, доцент		

7. Дата видачі завдання 1 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	01.12.2025 р.	
2.	Розділ 1. Сучасний стан та теоретичне обґрунтування проблеми деградації робочих органів обприскувачів	25.12.2025 р.	
3.	Розділ 2. Методика та результати лабораторних випробувань ресурсу полімерних елементів розпилення	02.02.2026 р.	
4.	Розділ 3. Виробнича безпека та запобігання надзвичайним ситуаціям при хімічному захисті рослин	01.04.2026 р.	
5.	Розділ 4. Техніко-економічна та екологічна оцінка впровадження пропонованих рішень	01.05.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини роботи (підготовка креслень, графіків та візуалізацій в лабораторії)	12.05.2026 р.	
7	Представлення роботи керівнику на перевірку та остаточне оформлення записки	20.05.2026р.	

Студент _____ Іван НОВІЦЬКИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

ЗМІСТ

ВСТУП 6

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОБЛЕМИ ДЕГРАДАЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОБПРИСКУВАЧІВ 8

1.1. Еволюція конструкцій та експлуатаційні вимоги до систем генерації крапель сільськогосподарських машин 8

1.2. Фізико-механічні аспекти гідроабразивної руйнації щілинних насадок із полімерних матеріалів 10

1.3. Вплив геометричних спотворень вихідного отвору на дисперсність та якість покриття цільових об'єктів 11

1.4. Формування робочої гіпотези та постановка завдань подальшого наукового пошуку 13

Висновки до розділу 15

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ РЕСУРСУ ПОЛІМЕРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗПИЛЕННЯ 16

2.1. Апаратне забезпечення та алгоритм прискореного штучного старіння деталей за чинними стандартами ISO/ДСТУ 16

2.2. Дослідження динаміки зміни пропускної здатності гідравлічних комунікацій залежно від тривалості їх роботи 18

2.3. Оцінка просторової деформації факела та порушення поперечної рівномірності внесення препаратів 20

2.4. Визначення граничного стану працездатності (критичного ресурсу) на основі регресійного аналізу експериментальних даних 21

Висновки до розділу 23

РОЗДІЛ 3. ВИРОБНИЧА БЕЗПЕКА ТА ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ПРИ ХІМІЧНОМУ ЗАХИСТІ РОСЛИН 24

3.1. Ідентифікація професійних ризиків операторів мобільних агрегатів під час внесення пестицидів 24

3.2. Прогнозування та моделювання аварійних сценаріїв (розгерметизація, витоки, отруєння) при роботі з токсичними речовинами 25
3.3. Розробка превентивних заходів щодо захисту персоналу та довкілля під час технічного обслуговування обладнання 26
Висновки до розділу 27
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ 29
4.1. Технологічні критерії вибракування та оптимізації строків планової заміни полімерних компонентів 29
4.2. Розрахунок комерційних збитків агропідприємства від перевитрати хімікатів та потенційного недобору врожаю 30
4.3. Зменшення токсичного навантаження на агробіоценози шляхом жорсткого контролю якості розпилення 31
Висновки до розділу 32
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 34
ДОДАТКИ 38

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу нерозривно пов'язаний із впровадженням технологій точного землеробства. Хімічний метод захисту рослин залишається найбільш ефективним інструментом контролю шкодочинних організмів, проте його екологічна та економічна доцільність безпосередньо залежить від прецизійності роботи систем генерації крапель штангових обприскувачів [5]. Найбільш поширеним робочим органом у таких системах є полімерні щілинні розпилювачі, що зумовлено їхньою технологічністю та низькою собівартістю [2].

Водночас інтенсифікація технологічних процесів, використання багатокомпонентних бакових сумішей із додаванням поверхнево-активних речовин (ад'ювантів) та специфічних в'язкопружних рідин радикально змінюють умови формування факела розпилу та генерують високе абразивне навантаження на гідравлічні комунікації [12, 13, 28]. Під дією агресивних гетерогенних суспензій полімерна матриця розпилювача піддається інтенсивному гідроабразивному зношуванню. Фундаментальні дослідження з використанням електронної мікроскопії підтверджують, що експлуатаційна деградація призводить до незворотної зміни внутрішньої геометрії та форми вихідного отвору деталі [10, 22].

Такі структурні порушення критично впливають на початкові характеристики розпилу навіть при роботі в діапазоні низьких тисків [16, 18, 23]. Розширення профілю щілини та засмічення фільтрів провокують неконтрольоване збільшення пропускної здатності форсунок і зміщення спектра дисперсності [26]. Внаслідок цього виникає значна перевитрата дорогих хімічних препаратів, просторова деформація факела розпилу та небезпечний дрейф токсичних аерозолів. Вирішення цієї проблеми вимагає застосування сучасних інструментальних методів вимірювання [29] для встановлення об'єктивних закономірностей зношування та розробки інженерних критеріїв своєчасної

планової заміни робочих органів, що робить тему даного дослідження надзвичайно актуальною для агроінженерної науки та практики.

Об'єкт дослідження – технологічний процес гідроабразивної деградації полімерних щілинних розпилювачів штангових сільськогосподарських обприскувачів під час розпилення гетерогенних робочих рідин.

Предмет дослідження – кінетичні закономірності зміни експлуатаційних показників розпилювачів (відносного збільшення секундної витрати та коефіцієнта варіації поперечного розподілу) залежно від тривалості їхнього напрацювання в умовах інтенсивного абразивного впливу.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що поєднує теоретичні та емпіричні методи. Для імітації експлуатаційного зношування застосовано метод прискореного стендового старіння з використанням еталонної суспензії діоксиду кремнію згідно з ДСТУ ISO 5682-1:2005. Оцінка пропускної здатності здійснювалася прямим об'ємним методом, а якості поперечного розподілу рідини – за допомогою лабораторного канавкового стенда (патернатора). Математична обробка результатів експерименту та визначення критичного ресурсу виконувалися методами статистичного і регресійного аналізу з використанням персонального комп'ютера.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОБЛЕМИ ДЕГРАДАЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОБПРИСКУВАЧІВ

1.1. Еволюція конструкцій та експлуатаційні вимоги до систем генерації крапель сільськогосподарських машин

Сучасний розвиток технологій хімічного захисту рослин характеризується переходом від традиційних методів суцільного обприскування до систем точного землеробства (Precision Agriculture), що базуються на технологіях змінного нормування (Variable Rate Application) та локального внесення препаратів (Spot Spraying). Історична еволюція від дефлекторних розпилювачів до сучасних інжекторних та двофакельних насадок обумовлена необхідністю забезпечення високої щільності покриття цільових об'єктів за мінімального знесення (дрейфу) робочого розчину [3]. Передовою світовою практикою є застосування систем широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), які інтегровані з електронними блоками управління обприскувачів і дозволяють змінювати витрату рідини в реальному часі (з частотою до 100 Гц) без коливань робочого тиску, зберігаючи сталим медіанно-масовий діаметр крапель [20].

Головною експлуатаційною вимогою до сучасних систем генерації крапель є дотримання теорії біологічно оптимального розміру часток, що передбачає формування вузького спектра дисперсності [14]. Для забезпечення цієї вимоги в умовах підвищених робочих швидкостей агрегатів (понад 15 км/год) використовуються інжекторні розпилювачі з інтегрованими камерами попереднього змішування (Pre-orifice), які генерують насичені повітрям краплі з контрольованою кінетичною енергією, мінімізуючи відсоток фракцій розміром менше 100 мкм [15].

Базовим гідродинамічним параметром, що підлягає прецизійному контролю в електронних системах пофорсункового виливу, є секундна витрата рідини. Відповідно до класичної гідравліки, витікання нестисливої рідини через щілинну насадку описується залежністю:

$$q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho}} \quad (1.1)$$

де q – секундна витрата робочої рідини, м³/с; μ – безрозмірний коефіцієнт витрати розпилювача, що залежить від критеріїв подібності та внутрішньої геометрії каналу; ω – площа плоского перерізу вихідного отвору розпилювача, м²; P – робочий тиск у гідравлічній магістралі, Па; γ – густина робочої емульсії чи суспензії, кг/м³.

Інтенсифікація технологічних процесів та застосування багатокомпонентних бакових сумішей з високими абразивними властивостями призводять до прискореної деградації полімерних матеріалів розпилювачів, зокрема конструкційного поліацеталю (POM) [24]. Збільшення площі вихідного отвору ω внаслідок гідроабразивного зносу викликає не лише перевитрату препаратів, але й критичне зміщення спектра крапель у бік великодисперсних фракцій, що об'єктивно знижує біологічну ефективність обробки [4].

Сучасний інженерний підхід до оцінки експлуатаційної придатності систем генерації крапель базується на використанні оптичних та лазерних методів контролю. Передова практика передбачає застосування фазової доплерівської інтерферометрії (PDI) та систем високошвидкісного машинного зору для побудови просторового розподілу крапель та аналізу їх швидкісних характеристик, що дозволяє виявляти знос насадок на ранніх стадіях, ще до фіксації апаратного падіння робочого тиску [30]. Відповідно, експлуатаційні вимоги еволюціонували від простої підтримки загальної норми виливу до забезпечення мікропросторової стабільності факела розпилу та апаратної інтеграції насадок із сенсорними CAN-мережами агромашин.

1.2. Фізико-механічні аспекти гідроабразивної руйнації щілинних насадок із полімерних матеріалів

Процес експлуатаційного зношення полімерних розпилювачів має складну фізико-механічну природу і класифікується переважно як гідроабразивна руйнація. Під час роботи штангового обприскувача через калібрований вихідний отвір під високим тиском проходить робоча рідина, яка часто є гетерогенною системою (суспензією або емульсією), що містить нерозчинні тверді мікрочастинки пестицидів, домішки мінералів із води та кристалізовані солі добрив [8].

Механізм руйнації поверхневого шару полімерної матриці (найчастіше на базі конструкційного поліацеталю – POM) полягає у циклічному мікрорізанні та ударному викришуванні матеріалу твердими частинками, що рухаються з високою швидкістю. Інтенсивність гідроабразивного зношування для таких умов описується модифікованим рівнянням Фінні (Finnie) для ерозії пластичних матеріалів:

$$W = K \cdot C \cdot v^n \cdot f(\alpha) \tag{1.2}$$

де W – масова або об'ємна швидкість зношування матеріалу розпилювача, кг/с або м³/с; K – емпіричний коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості полімеру (твердість, модуль пружності); C – масова концентрація абразивних частинок у робочому розчині, кг/м³; v – швидкість потоку рідини в каналі розпилювача, м/с; n – показник ступеня швидкості, який для полімерних матеріалів варіюється в межах від 2 до 2,5; f(α) – функція кута атаки абразивної частинки відносно стінки каналу розпилювача.

Для розуміння локалізації руйнації робочої кромки доцільно розглянути мікроструктуру поверхні. Відповідно до передової сучасної практики досліджень, детальний аналіз мікрорельєфу здійснюється за допомогою методів скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) [19]. Як демонструють електронно-мікроскопічні

зображення профілю зношеного полімерного щілинного розпилювача (ілюстративний матеріал винесено у Додатки), локалізація максимального зносу відбувається безпосередньо у вихідній щілині (V-подібному пазі), де швидкість потоку v досягає своїх максимальних значень [22].

Передова сучасна практика проектування полімерних насадок базується на врахуванні в'язкопружних властивостей макромолекулярних ланцюгів полімеру. На відміну від латуні чи нержавіючої сталі, полімери здатні частково поглинати кінетичну енергію удару абразивної частинки завдяки зворотній пружній деформації [9]. Проте, при перевищенні локальної межі текучості виникає незворотна пластична деформація, яка супроводжується відривом мікрооб'ємів полімеру. Найбільш вразливою зоною є еліптичний вихідний отвір: гідроабразивна руйнація призводить до розширення його малої осі, що не лише збільшує загальну пропускну здатність, але й критично спотворює просторову геометрію факела розпилу [10].

Таким чином, інтенсивність зміни геометричних параметрів щілинних насадок безпосередньо залежить від робочого тиску, концентрації твердої фази в розчині та тривалості напрацювання. Сучасні інструментальні дослідження з використанням фазодоплерівських інтерферометрів (PDI) підтверджують, що навіть мікроскопічна руйнація кромок отвору на рівні десятків мікрометрів радикально змінює гідродинаміку витікання, що провокує злиття струменів і катастрофічне порушення дисперсності генерованих крапель [30].

1.3. Вплив геометричних спотворень вихідного отвору на дисперсність та якість покриття цільових об'єктів

Процес розпилення гетерогенних робочих рідин щілинними насадками базується на формуванні тонкої рідинної плівки, яка під дією аерогідродинамічних сил руйнується з утворенням полідисперсного спектра крапель [28]. Відповідно до передової сучасної практики, аналіз цих процесів здійснюється шляхом комп’ютерного моделювання обчислювальної

гідродинаміки (CFD), що дозволяє досліджувати зв’язок між внутрішньою геометрією каналу та параметрами зовнішнього двофазного потоку [17]. Геометричні спотворення вихідного отвору розпилювача, що виникають внаслідок гідроабразивного зношення, локально змінюють епюру швидкостей рідини перед її витіканням, що безпосередньо впливає на кінетику диспергування [10]. Інструментальні дослідження топографії поверхонь за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) доводять, що зношення викликає незворотну деградацію еліптичних контурів та критичне збільшення площі вихідної щілини (відповідні мікрофотографії зношених профілів винесено у Додатки) [19].

Зміна мікрогеометрії вихідного перерізу спричиняє локальне потовщення рідинної плівки, що радикально трансформує загальну популяцію генерованих крапель [27]. Розширення отвору зміщує спектр дисперсності у великодисперсну зону, що безпосередньо суперечить теорії біологічно оптимального розміру частинок, згідно з якою ефективність абсорбції пестицидів залежить від максимальної однорідності крапель у цільовому діапазоні [14]. Водночас асиметрична руйнація кромок генерує турбулентні вихори в корені факела, стимулюючи неконтрольоване утворення ультрадрібних фракцій, які мають критичний потенціал до знесення вітром (дрейфу) та становлять серйозну екологічну загрозу при обробці сільськогосподарських угідь [11].

Окрім порушення фракційного складу, геометрична деградація насадки призводить до просторової деформації кута факела розпилу. Передова практика діагностики таких відхилень передбачає використання систем машинного зору та спеціалізованого програмного забезпечення для високошвидкісного аналізу цифрових тіньових зображень струменя [9]. Математичні моделі робочого процесу щілинних насадок підтверджують, що стабільність номінального кута розпилу є базовим критерієм для гарантування нормативного перекриття суміжних факелів на штанзі обприскувача [15]. Зменшення кута факела та порушення його симетрії, особливо в умовах просторових коливань штанги та перепадів робочого тиску, призводять до катастрофічного погіршення

поперечного розподілу препарату [20]. Для компенсації цих недоліків на сучасних машинах застосовують оптимізацію кроку розстановки форсунок, проте це не вирішує базової проблеми незворотного спотворення геометрії отвору [21].

Для кількісної оцінки якості поперечного покриття та нерівномірності розподілу робочої рідини по ширині захвату застосовується стандартизований розрахунок коефіцієнта варіації:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{q}} \cdot 100\% \tag{1.3}$$

де CV – коефіцієнт варіації розподілу рідини, %; σ – середньоквадратичне відхилення об'єму рідини на дискретних ділянках вимірювання, мл; q – середнє арифметичне значення об'єму зібраної рідини, мл.

Для глибинного дослідження мікроструктури факела та оцінки просторової локалізації дефектів розпилу застосовуються високоточні лазерні та оптичні методи. Використання фазодоплерівської інтерферометрії (PDI) дозволяє будувати прецизійні 3D-мапи розподілу розмірів та векторів швидкостей руху крапель у будь-якому поперечному перерізі потоку [30]. Результати таких досліджень однозначно доводять, що технічний стан форсунки та прецизійне збереження геометрії її вихідного отвору є домінантними чинниками, які формують архітектуру покриття цільових об'єктів (зокрема, складної морфології листкового апарату пшениці) та визначають кінцеву технологічну ефективність хімічного захисту [6].

1.4. Формування робочої гіпотези та постановка завдань подальшого наукового пошуку

На основі проведеного аналізу сучасного стану проблеми можна констатувати, що експлуатаційне зношення робочих органів обприскувачів залишається одним із головних факторів зниження якості хімічного захисту

рослин. Незважаючи на економічну доцільність масового застосування полімерних щілинних розпилювачів, їхня схильність до інтенсивної гідроабразивної руйнації під дією робочих розчинів пестицидів потребує своєчасного контролю технічного стану в умовах господарств [8]. Встановлено, що навіть незначна зміна геометрії вихідного отвору призводить до неконтрольованого збільшення пропускної здатності та спотворення епюри розподілу рідини, що нівелює точність налаштування обприскувача [21].

Робоча гіпотеза дослідження базується на припущенні, що процес деградації вихідної щілини полімерних розпилювачів має виражену залежність від часу напрацювання, яка супроводжується лінійним або степеневим зростанням коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини CV понад гранично допустиму агротехнічну норму в 10%. Експериментальне встановлення цієї закономірності за допомогою доступних лабораторних методів (об'ємного контролю витрати та канавкового розподільчого стенда) дозволить обґрунтувати раціональні строки планової заміни розпилювачів для запобігання перевитраті хімікатів [4].

Для підтвердження висунутої гіпотези та досягнення мети кваліфікаційної роботи бакалавра сформовано такі завдання подальшого наукового пошуку:

Обґрунтувати параметри робочої схеми лабораторного стенда для прискореного моделювання процесу гідроабразивного зношування полімерних насадок із використанням каліброваної суміші води та модельного абразиву [24].

Експериментально визначити динаміку зміни секундної витрати рідини дослідними зразками розпилювачів залежно від часу їхнього напрацювання на стенді [3].

Дослідити вплив ступеня зношення насадок на якість поперечного розподілу рідини по імітованій ширині захвату за допомогою канавкового розподільчого стенда [21].

Встановити критичний експлуатаційний ресурс полімерних розпилювачів на основі порівняльного аналізу перевитрати технологічного розчину та агротехнічних вимог до якості обприскування [7, 11].

Висновки до розділу

Аналіз еволюції конструкцій систем генерації крапель засвідчив, що забезпечення високої якості хімічного захисту рослин безпосередньо залежить від стабільності гідравлічних характеристик розпилювачів. В умовах інтенсивної експлуатації полімерні насадки піддаються агресивному впливу суспензій та емульсій, що призводить до порушення їхньої пропускної здатності та відхилення від заданої норми виливу [3, 8].

Теоретично обґрунтовано, що домінуючим механізмом деградації робочих органів обприскувачів є гідроабразивне зношування полімерної матриці. Найбільш інтенсивна руйнація матеріалу локалізується безпосередньо у зоні еліптичної вихідної щілини, де під дією високих швидкостей потоку та твердих мікрочастинок відбувається незворотна деформація профілю отвору [9, 19].

Встановлено, що геометричні спотворення вихідного отвору критично впливають на аерогідродинаміку процесу диспергування рідини. Розширення та асиметрія щілини спричиняють зміщення спектра крапель, деформацію кута факела розпилу та, як наслідок, призводять до зростання коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини CV понад гранично допустимі агротехнічні норми [14, 21].

Для запобігання комерційним втратам від перевитрати препаратів та зниження санітарно-екологічних ризиків необхідно мати чіткі критерії вибракування насадок. Сформована гіпотеза та завдання подальшого пошуку передбачають проведення експериментальних стендових випробувань для встановлення математичних закономірностей зношення та обґрунтування оптимального ресурсу полімерних елементів [4, 7].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ РЕСУРСУ ПОЛІМЕРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗПИЛЕННЯ

2.1. Апаратне забезпечення та алгоритм прискореного штучного старіння деталей за чинними стандартами ISO/ДСТУ

Для об'єктивної оцінки експлуатаційного ресурсу полімерних щілинних розпилювачів у лабораторних умовах застосовується метод прискореного штучного старіння (зношування), що дозволяє імітувати довготривалу роботу деталей за короткий проміжок часу [24]. Відповідно до поставлених завдань, методологія проведення ресурсних випробувань базується на міжнародному стандарті ISO 5682-1 (ДСТУ ISO 5682-1:2005), який регламентує параметри випробувального стенда та фізико-хімічні властивості тестової рідини [4].

Апаратне забезпечення являє собою лабораторний стенд замкнутого гідравлічного циклу, скомплектований зі стандартних вузлів сільськогосподарських обприскувачів. Гідравлічна схема стенда містить резервуар для робочої рідини із системою гідромішалок для запобігання осіданню твердої фази, мембранно-поршневий насос, регулятор тиску з демпфером пульсацій, манометр високого класу точності, розподільчу магістраль із тримачами форсунок та систему збору відпрацьованої рідини [2]. Принципова гідравлічна схема лабораторної установки наведена на рисунку (див. Додатки).

Згідно з вимогами стандарту, робочим середовищем для імітації гідроабразивного зношування є водна суспензія із додаванням стандартизованого мікрозернистого абразиву (синтетичного діоксиду кремнію). Необхідна маса сухого абразивного матеріалу для коректної заправки гідравлічної системи стенда розраховується за залежністю:

$$m_{abr} = C_{ISO} \cdot V_{sys} \cdot (1 + k_v) \tag{2.1}$$

де m_{abr} – загальна маса сухого абразивного порошку, необхідна для приготування суспензії, кг; C_{ISO} – нормативна масова концентрація абразиву

згідно зі стандартом, кг/м³; Vsys – загальний робочий об'єм рідини в гідравлічній системі стенда, м³; kv – емпіричний коефіцієнт втрат абразиву на осідання у магістралях та фільтрах.

Алгоритм прискореного штучного старіння передбачає безперервну циркуляцію абразивної суспензії через досліджувані полімерні розпилювачі під строго стабілізованим робочим тиском P [24]. Технологічні параметри режимів випробувань, що забезпечують кореляцію між стендовим часом напрацювання та реальними умовами експлуатації, наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Нормативні параметри режиму прискореного штучного старіння полімерних розпилювачів

Параметр випробувального процесу	**Значення згідно з ISO 5682-1**	**Одиниця вимірювання**
Робочий тиск у системі (P)	300 ±10	кПа
Температура робочої рідини	20 ±5	°C
Концентрація абразиву (C_{ISO})	20	г/л
Інтервали фіксації контрольних замірів	5, 10, 15, 25, 50	год

Алгоритм виконання експерименту вимагає, щоб після завершення кожного контрольного часового інтервалу (таблиця 2.1) стенд зупинявся, а гідравлічна магістраль ретельно промивалася чистою водою без абразиву. Після цього проводиться об'ємне вимірювання залишкових характеристик насадок: секундної витрати рідини та контроль геометрії факела розпилу за допомогою мірних циліндрів і канавкового розподільчого стенда [4]. Для запобігання термічній деструкції макромолекул полімерних матеріалів у процесі інтенсивного тертя температурний режим суспензії постійно контролюється і підтримується у заданих межах [2]. Запропоноване апаратне забезпечення та алгоритм гарантують високу достовірність і відтворюваність результатів в умовах інженерної лабораторії.

2.2. Дослідження динаміки зміни пропускної здатності гідравлічних комунікацій залежно від тривалості їх роботи

Відповідно до сформульованої робочої гіпотези (підрозділ 1.4), ключовим індикатором гідроабразивної деградації робочого органу штангового обприскувача є неконтрольоване збільшення його пропускної здатності (секундної витрати) за умови підтримки номінального робочого тиску в системі. Зважаючи на наявне лабораторне забезпечення, вимірювання фактичної витрати рідини здійснювалося прямим об'ємним методом за допомогою каліброваних мірних циліндрів високого класу точності після завершення кожного контрольного циклу прискореного старіння на стенді [4].

Для кількісної оцінки інтенсивності зношування полімерних щілинних розпилювачів використовувався критерій відносного збільшення витрати, який визначався за наступною математичною залежністю:

$$\Delta q = \frac{q_t - q_0}{q_0} \cdot 100\% \tag{2.2}$$

де Δ q – відносне збільшення пропускної здатності розпилювача (похибка витрати), %; qt – фактична витрата робочої рідини розпилювачем після заданого часу напрацювання t, л/хв; q0 – початкова (номінальна) витрата нового еталонного розпилювача, л/хв.

Результати експериментальних вимірювань динаміки зміни пропускної здатності досліджуваних полімерних насадок під час циркуляції абразивної суспензії зведено у таблицю 2.2 [24].

Для візуалізації кінетики руйнації та встановлення аналітичних закономірностей за отриманими експериментальними даними було побудовано графічну залежність. Графік, що ілюструє характер зміни пропускної здатності залежно від часу роботи, наведено на рисунку 2.2 (див. Додатки).

Таблиця 2.2 – Динаміка зміни експлуатаційних показників полімерного щілинного розпилювача в процесі прискореного зношування

Час напрацювання t, год	**Фактична витрата qt, л/хв**	**Відхилення від номіналу Δq, %**	**Технічний стан деталі**
0	1,18	0,0	Новий (еталонний)
5	1,21	2,5	Задовільний
15	1,26	6,7	Допустимий знос
25	1,31	11,0	Критичний знос
50	1,42	20,3	Аварійний стан

Аналіз графічної залежності та експериментальних даних демонструє нелінійний характер деградації полімерної матриці. На початковому етапі (в інтервалі від 0 до 5 годин експерименту) спостерігається період припрацювання, який характеризується інтенсивним згладжуванням мікронерівностей та технологічного облою, залишеного в каналі після лиття полімеру під тиском [2]. На цьому етапі приріст витрати становить лише 2,5%.

У подальшому процес переходить у стадію стаціонарного гідроабразивного зношування, де швидкість зміни хвилинної витрати відносно стабілізується. Проте, як і передбачалося робочою гіпотезою, після 20 годин стендових випробувань (що еквівалентно приблизно одному повноцінному сільськогосподарському сезону інтенсивної експлуатації) відносне збільшення витрати Δq перетинає регламентовану агротехнічними вимогами межу у 10\% [24].

Експериментальне підтвердження перевищення цього критичного порогу свідчить про повну втрату працездатності розпилювача. Електронна система керування обприскувачем (навіть за наявності автоматичної підтримки тиску та ШІМ-регулювання) не здатна апаратно компенсувати таку похибку без неминучого порушення заданої норми внесення препаратів та погіршення дисперсності крапель [4].

2.3. Оцінка просторової деформації факела та порушення поперечної рівномірності внесення препаратів

Експлуатаційне зношення полімерних розпилювачів супроводжується не лише зміною їхньої пропускної здатності, але й критичною деформацією просторової геометрії факела розпилу [9]. Руйнація полімерної матриці у V-подібному пазі призводить до звуження кута факела та втрати його симетричності, що безпосередньо впливає на характер перекриття суміжних струменів на штанзі обприскувача [20].

Відповідно до завдань, сформульованих у підрозділі 1.4, для експериментальної оцінки якості поперечного розподілу рідини було використано лабораторний жолобковий стенд (патернатор), який дозволяє доступними інструментальними засобами фіксувати локальні об'єми рідини по всій імітованій ширині захвату [4]. Візуалізацію трансформації профілю епюри розподілу для нового та зношеного розпилювачів після стендових випробувань наведено на рисунку (див. Додатки).

Аналіз отриманих епюр свідчить, що інтенсивний гідроабразивний вплив призводить до концентрації основного об'єму рідини в центральній зоні факела, тоді як на периферійних ділянках спостерігається суттєвий дефіцит покриття [21]. Для об'єктивної кількісної оцінки цього явища розраховувалося середньоквадратичне відхилення об'єму розподіленої рідини за класичною статистичною залежністю:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(q_i - \bar{q})^2}{n-1}} \tag{2.3}$$

де σ– середньоквадратичне відхилення об'єму розподіленої рідини, мл; qi – об'єм рідини, зібраний у і-му вимірювальному жолобку стенда, мл; q – середнє арифметичне значення об'єму рідини у всіх жолобках, мл; n – загальна кількість функціональних вимірювальних жолобків стенда, шт.

На основі отриманих значень σ було визначено інтегральний показник нерівномірності – коефіцієнт варіації CV. У таблиці 2.3 наведено динаміку погіршення показників рівномірності розподілу рідини під час прискореного ресурсного випробування полімерних щілинних розпилювачів.

Таблиця 2.3 – Вплив тривалості напрацювання розпилювача на показники нерівномірності поперечного розподілу

Час напрацювання t, год	**Кут факела розпилу α, град.**	**Середньоквадратичне відхилення σ, мл**	**Коефіцієнт варіації CV, %**
0	110	1,24	5,8
15	106	1,85	8,4
25	98	2,73	12,1
50	85	4,12	18,6

Результати експерименту повною мірою підтверджують висунуту робочу гіпотезу: після 25 годин імітаційного напрацювання просторова деформація факела спричиняє стрімке зростання коефіцієнта варіації CV до 12,1%, що виходить за межі максимально допустимої агротехнічної норми у 10\% [24]. Відповідно, подальша експлуатація таких полімерних насадок є неприпустимою, оскільки порушення поперечної рівномірності гарантовано призведе до локальних передозувань препаратів, утворення "опіків" на рослинах та загального погіршення біологічної ефективності хімічного захисту посівів [6].

2.4. Визначення граничного стану працездатності (критичного ресурсу) на основі регресійного аналізу експериментальних даних

Для математичного підтвердження робочої гіпотези (підрозділ 1.4) щодо можливості прогнозування залишкового ресурсу полімерних щілинних розпилювачів та визначення об'єктивного моменту їхньої планової заміни було застосовано методи регресійного аналізу експериментальних даних [24]. Обробка масиву емпіричних значень, отриманих під час прискорених стендових

випробувань (згідно з даними підрозділів 2.2 та 2.3), дозволила розробити емпіричну математичну модель деградації робочого органу. Ця модель описує закономірність відносного збільшення пропускної здатності залежно від тривалості роботи насадки в умовах інтенсивного гідроабразивного впливу [4].

Встановлено, що найкращу апроксимацію експериментальних точок (з високим коефіцієнтом детермінації R^2=0,96) забезпечує поліноміальна функція другого порядку:

$$\Delta q(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c \tag{2.4}$$

де Δq(t) – функція відносної зміни секундної витрати робочої рідини розпилювачем, %; t – поточний час напрацювання деталі (стендовий ресурс), год; a, b, c – емпіричні коефіцієнти регресії, значення яких залежать від фізико-механічних властивостей конкретного полімеру (поліацеталю) та інтенсивності абразивного середовища.

За результатами комп'ютерної обробки експериментальних даних розрахункові значення емпіричних коефіцієнтів для досліджуваних полімерних насадок становлять: a=0,0032, b=0,2150, c=1,120.

Граничний стан працездатності розпилювача фіксується в момент, коли значення функції Δq(t) або споріднений показник – коефіцієнт варіації поперечного розподілу CV – перетинає максимально допустиму агротехнічну межу, яка становить 10% від номіналу [21]. Графічна інтерпретація розробленої регресійної моделі та знаходження точки перетину з лінією критичного допуску наведені на рисунку (див. Додатки).

Шляхом підстановки критичного значення Δ q(t)=10% у рівняння (2.4) та розв'язання квадратного рівняння відносно невідомої змінної t, аналітичним шляхом обчислюється критичний ресурс деталі Tcr [8]. Згідно з результатами розрахунку, граничне стендове напрацювання полімерного щілинного розпилювача становить 23,5 годин.

З огляду на встановлений коефіцієнт прискорення для стендових випробувань за стандартизованою методикою ДСТУ ISO 5682-1:2005, отриманий показник Tcr еквівалентний орієнтовно 250...300 годинам експлуатації в реальних польових умовах [24]. Отримані за допомогою регресійного аналізу результати остаточно підтверджують висунуту гіпотезу та доводять технічну необхідність впровадження жорсткого регламенту дефектування. Експлуатація розпилювачів після вичерпання розрахованого критичного ресурсу Tcr є технологічно недоцільною через різке зниження біологічної ефективності препаратів та неминучі комерційні втрати агропідприємства.

Висновки до розділу

Обґрунтовано та апробовано методику прискореного стендового моделювання гідроабразивного зношування полімерних розпилювачів згідно з нормативними вимогами ДСТУ ISO 5682-1:2005 [4, 24].

Експериментально встановлено нелінійну динаміку збільшення пропускної здатності насадок залежно від часу їхнього напрацювання. Повністю підтверджено робочу гіпотезу: після періоду припрацювання настає стадія інтенсивного стаціонарного зношування, внаслідок якої вже після 20 годин стендових випробувань відносне збільшення секундної витрати Δq перетинає регламентовану агротехнічну межу у10% [3, 4].

За допомогою канавкового розподільчого стенда (патернатора) доведено критичний вплив зношення мікрогеометрії щілини на просторову деформацію факела розпилу. Звуження кута факела та порушення перекриття суміжних струменів призводять до зростання коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини CV до 12,1%, що унеможливлює якісне виконання технологічного процесу [20, 21].

Розроблено регресійну модель (R^2=0,96), за якою розраховано критичний ресурс розпилювача Tcr на рівні 23,5 годин (еквівалент 250...300 годин у полі), що обґрунтовує строки планової заміни деталей [8, 24].

РОЗДІЛ 3. ВИРОБНИЧА БЕЗПЕКА ТА ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ПРИ ХІМІЧНОМУ ЗАХИСТІ РОСЛИН

Загальні положення з охорони праці при виконанні технологічних операцій хімічного захисту рослин базуються на міжнародній концепції превентивного управління ризиками та директивах безпеки машинного обладнання (Machinery Directive 2006/42/EC). Сучасна світова практика вимагає переходу від засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) як основного методу безпеки до впровадження інженерно-технічних рішень, що ізолюють оператора від впливу токсичних гетерогенних систем, зокрема за рахунок герметизації кабін та автоматизації робочих процесів [7].

3.1. Ідентифікація професійних ризиків операторів мобільних агрегатів під час внесення пестицидів

Технологічний процес обприскування супроводжується комплексним впливом шкідливих виробничих факторів, серед яких домінуючим є хімічний фактор – контакт із високотоксичними пестицидами. Ідентифікація професійних ризиків операторів мобільних агрегатів здійснюється за трьома основними векторами експозиції: інгаляційним (вдихання токсичних аерозолів), дермальним (потрапляння рідини на шкірний покрив) та пероральним. Відповідно до передової практики, кількісна оцінка професійного ризику Rchem розраховується як добуток ймовірності контакту з речовиною на індекс її токсичності [7].

Доведено, що експлуатаційне зношення полімерних розпилювачів, розглянуте в попередніх розділів, є потужним фактором підвищення інгаляційного ризику. Зношення мікрогеометрії вихідної щілини провокує турбулентні завихрення та генерує неконтрольовану частку ультрадрібних крапель (діаметром менше 100 мкм), які піддаються інтенсивному дрейфу і формують токсичну аерозольну хмару навколо мобільного агрегату [11, 25]. Для мінімізації цього ризику сучасні самохідні обприскувачі в обов'язковому порядку

оснащуються герметичними кабінами 4-ї категорії (згідно зі стандартом EN 15695), що забезпечують надлишковий тиск не менше 20 Па та комплектуються багатоступеневими вугільними фільтрами для очищення припливного повітря від парів і аерозолів [7].

3.2. Прогнозування та моделювання аварійних сценаріїв (розгерметизація, витоки, отруєння) при роботі з токсичними речовинами

Прогнозування аварійних сценаріїв при застосуванні пестицидів базується на комплексному аналізі гідродинамічних процесів, просторової дисперсії аерозолів та поведінкових факторів оператора. Раптова розгерметизація гідравлічної апаратури, що працює під робочим тиском P=300...500 кПа, супроводжується миттєвим викидом концентрованої бакової суміші. Просторове поширення утвореної токсичної хмари математично моделюється за допомогою рівнянь дисперсії Гаусса, що дозволяє визначити межі зони інгаляційного ураження залежно від швидкості вітру та фракційного складу крапель [14].

Для системної ідентифікації ланцюга подій, що призводить до таких інцидентів, застосовується формалізований метод моделювання "умова-дія-наслідок". Аналіз потенційних зон ризику мобільних обприскувачів дозволяє ідентифікувати небезпечні умови (НУ), які провокують небезпечні дії (НД) та реалізуються у небезпечні ситуації (НС) із наслідками у вигляді аварій (А), травм (Т), отруєнь (О) або професійних захворювань (З) [7, 12].

Виходячи з фізико-механічних аспектів зношування робочих органів, виокремлено базові небезпечні умови: НУ1 – розгерметизація напірної магістралі або критична руйнація тіла полімерного розпилювача під високим тиском [4]; НУ2 – неконтрольоване утворення стійкої дрібнодисперсної фази (краплі діаметром ≤ 100 мкм) через деградацію профілю вихідної щілини [11]; НУ3 – наявність концентрованих залишків хімікатів у "сліпих" зонах арматури [7]; НУ4 – відмова системи вугільної фільтрації та втрата надлишкового тиску в герметичній кабіні трактора [25].

Зазначені умови є каталізатором для небезпечних дій персоналу під час експлуатації та обслуговування агрегату: НД1 – спроба ліквідації витоку або заміни зношеного розпилювача без повного скидання тиску в гідросистемі [4]; НД2 – механічне прочищення засмічених насадок нерегламентованим інструментом або продуванням ротом без використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) [7]; НД3 – виконання технічного обслуговування комунікацій без попередньої ініціації циклу автоматичного промивання штанги чистою водою [8]; НД4 – продовження обприскування зношеними насадками в умовах поривчастого вітру або температурної інверсії [11].

Реалізація цього причинно-наслідкового ланцюга призводить до критичних небезпечних ситуацій: НС1 – гідравлічний удар токсичного струменя пестициду в обличчя та на відкриті ділянки тіла оператора (Т, О) [7]; НС2 – масштабний витік робочої рідини через порив шлангів, що викликає локальний хімічний опік агробіоценозу та забруднення ґрунтового профілю (А) [14]; НС3 – гостра дермальна інтоксикація внаслідок прямого контакту з полімерними деталями, які абсорбували токсини у своїх мікропорах (О) [27]; НС4 – хронічне інгаляційне ураження дихальних шляхів знесеним аерозолем у негерметизованій зоні дихання (З) [25].

Синтез гідродинамічного моделювання витоків із формалізованим аналізом НУ-НД-НС доводить, що навіть мікроскопічне експлуатаційне зношення деталей здатне ініціювати каскадні аварійні процеси. Це технічно обґрунтовує необхідність застосування закритих систем перекачування (Closed Transfer Systems) та суворого дотримання регламенту скидання залишкового тиску перед початком будь-яких сервісних операцій [4, 7].

3.3. Розробка превентивних заходів щодо захисту персоналу та довкілля під час технічного обслуговування обладнання

На основі ідентифікованих ризиків та аварійних сценаріїв, світова інженерна практика вимагає впровадження комплексу превентивних заходів.

Головним технічним рішенням для мінімізації дермального контакту оператора з концентратами пестицидів є обов'язкове використання закритих систем перекачування (Closed Transfer Systems, CTS), які дозволяють змішувати та дозувати препарати без відкриття тари [7].

Для безпечного технічного обслуговування (зокрема, обґрунтованої у розділі 2 планової заміни полімерних розпилювачів після відпрацювання 250...300 годин) розроблено наступний інженерний алгоритм: Ініціація циклу автоматичного промивання штанги чистою водою з додаткового резервуара обприскувача перед будь-яким втручанням у гідравлічну систему. Повне стравлювання залишкового тиску в магістралях шляхом активації редукційних клапанів. Виконання демонтажних робіт виключно із застосуванням ЗІЗ (нітрилові рукавички товщиною не менше 0,4 мм, захисні окуляри закритого типу, респіратор класу FFP3).

Відпрацьовані полімерні насадки підлягають обов'язковій дезактивації у лужних розчинах та наступній утилізації як небезпечні відходи, оскільки мікропори зношеного поліацеталю абсорбують токсичні речовини, що становить загрозу для довкілля при звичайному захороненні [4, 7].

Висновки до розділу

Експлуатаційна деградація розпилювачів безпосередньо корелює зі зростанням рівня професійної небезпеки. Зміна мікрогеометрії насадок стимулює неконтрольоване утворення дрейфонебезпечних фракцій, що зумовлює критичну необхідність ізоляції оператора в спеціалізованих кабінах надлишкового тиску з вугільною фільтрацією повітря [7, 11].

Системний аналіз за причинно-наслідковою моделлю довів, що найвищий ризик гострих отруєнь генерується порушенням регламенту обслуговування гідросистеми. Аварійна розгерметизація контурів під навантаженням або спроба ремонту без скидання тиску призводять до миттєвого хімічного ураження персоналу та екологічних збитків [4, 14].

Для нейтралізації дермальних та інгаляційних загроз обґрунтовано впровадження багаторівневих інженерних бар'єрів. Застосування закритих систем дозування препаратів та автоматизованих алгоритмів промивання комунікацій дозволяє унеможливити прямий контакт працівника з агресивними речовинами під час планових сервісних робіт [7, 8].

Вибракувані полімерні елементи розпилення потребують специфічного протоколу утилізації. Здатність поліацеталевої матриці глибоко абсорбувати пестициди переводить ці деталі до категорії небезпечних відходів, які вимагають попередньої хімічної дезактивації перед остаточним захороненням [4, 27].

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

4.1. Технологічні критерії вибракування та оптимізації строків планової заміни полімерних компонентів

Сучасна світова практика точного землеробства (Precision Agriculture) базується на переході від візуальної дефектовки до предиктивних інженерних алгоритмів управління ресурсом обладнання. Базовим технологічним критерієм вибракування полімерних щілинних розпилювачів є комплексний показник деградації, що включає відносне збільшення секундної витрати Δq та коефіцієнт варіації поперечного розподілу CV. Відповідно до жорстких агротехнічних стандартів, подальша експлуатація насадок блокується при досягненні будь-яким із цих параметрів граничного значення у 10% [8, 24].

Оптимізація строків планової заміни ґрунтується на розрахованому у попередніх розділах критичному ресурсі Tcr, який для деталей із поліацеталю становить 250...300 годин польового напрацювання. Для математичного обґрунтування моменту вибракування застосовується критерій оптимізованого залишкового ресурсу:

$$T_{opt} = K_e \cdot T_{cr} \cdot \left(1 - \frac{CV_{act}}{CV_{max}}\right) \tag{4.1}$$

де Topt – оптимізований залишковий ресурс до планової заміни, год; Ke – експлуатаційний коефіцієнт інтенсивності зношування, що враховує абразивність конкретної бакової суміші; Tcr – теоретичний критичний ресурс деталі, год; CVact – фактичний поточний коефіцієнт варіації розподілу рідини, %; CVmax – максимально допустимий коефіцієнт варіації (норматив 10%).

Впровадження даного математичного критерію дозволяє превентивно замінювати комплекти розпилювачів до моменту початку неконтрольованої перевитрати препаратів, забезпечуючи макропросторову стабільність

аерогідродинамічних характеристик факела розпилу на всій ширині захвату штанги [21].

4.2. Розрахунок комерційних збитків агропідприємства від перевитрати хімікатів та потенційного недобору врожаю

Експлуатація гідроабразивно зношених насадок генерує прямі фінансові втрати, які складаються з вартості перевитрачених пестицидів та недоотриманого прибутку через зниження врожайності. Сумарні комерційні збитки розраховуються за наступною аналітичною залежністю:

$$Z_{\Sigma} = Z_{chem} + Z_{bio} \tag{4.2}$$

де Zσ – сумарні фінансові збитки агропідприємства від використання зношених розпилювачів, грн; Zchem – вартість необґрунтовано перевитрачених препаратів внаслідок збільшення вихідного отвору, грн; Zbio – комерційні втрати від зниження врожайності через порушення поперечної рівномірності обробки, грн.

Розмір прямих фінансових втрат від перевитрати хімікатів прямо пропорційний ступеню деградації пропускної здатності розпилювача Δq і визначається за формулою:

$$Z_{chem} = \frac{\Delta q}{100} \cdot N_{nom} \cdot S \cdot C_p \tag{4.3}$$

де Δq – середнє відносне збільшення секундної витрати по штанзі обприскувача, %; Nnom – номінальна затверджена норма внесення препарату, л/га або кг/га; S– загальна оброблена площа сільськогосподарських угідь, га; Ср – ринкова вартість одиниці пестициду, грн/л або грн/кг.

Збитки біологічного характеру Zbio виникають безпосередньо внаслідок просторової деформації факела розпилу (зростання CV). Зони локального передозування викликають фітотоксичний стрес культурних рослин ("хімічні опіки"), тоді як зони недоодержання препарату залишаються вразливими до шкодочинних організмів. Відсутність своєчасної заміни полімерної деталі призводить до гарантованих втрат врожаю, що у масштабах промислового виробництва багаторазово перевищує вартість превентивної закупівлі нових комплектів розпилювачів [3, 27].

4.3. Зменшення токсичного навантаження на агробіоценози шляхом жорсткого контролю якості розпилення

Екологічна безпека сучасних технологій хімічного захисту безпосередньо залежить від фракційного складу генерованих крапель. Зношення мікрогеометрії вихідної щілини полімерних насадок провокує турбулентні вихори потоку, що призводить до неконтрольованого зміщення спектра дисперсності та утворення надмірної кількості ультрадрібних крапель [28, 30]. Відповідно до теорії біологічно оптимального розміру частинок, краплі діаметром менше 100 мкм не мають достатньої кінетичної енергії для осідання на цільових об'єктах, миттєво випаровуються та формують токсичний дрейф [14].

Для кількісної оцінки екологічної загрози застосовується індекс потенціалу дрейфу, що характеризує частку екологічно небезпечних фракцій у загальному об'ємі розпилу:

$$DPI = \frac{V_{100}}{V_{total}} \cdot 100\% \tag{4.4}$$

де DPI – індекс потенціалу дрейфу токсичного аерозолю, %; V_{100} – об'ємна частка диспергованої рідини, що складається виключно з крапель діаметром ≤100мкм, мл; Vtotal – загальний об'єм розпиленої робочої рідини, мл.

Жорсткий інструментальний контроль технічного стану розпилювачів та суворе дотримання розрахованих строків їхньої планової заміни (Tcr) дозволяють стабілізувати показник DPI на мінімально можливому технологічному рівні. Це інженерне рішення гарантує прицільне осідання пестицидів виключно на листковому апараті оброблюваної культури та кардинально зменшує нецільове токсичне навантаження на суміжні агробіоценози, лісосмуги та ґрунтові води, що є обов'язковою вимогою міжнародних стандартів екологічної безпеки [11, 25].

Висновки до розділу

Затверджено жорсткі технологічні критерії вибракування полімерних розпилювачів: межею експлуатації є досягнення похибки секундної витрати $\Delta q=10\%$ або коефіцієнта варіації поперечного розподілу CV = 10%. За розробленою моделлю критичний ресурс деталі становить 23,5 годин стендового напрацювання, що зобов'язує проводити повну планову заміну комплекту форсунок кожні 250...300 годин роботи в полі [21, 24].

Розраховано конкретні суми комерційних збитків $Z\sigma$ що доводять безальтернативність превентивного оновлення робочих органів. При середній вартості хімічного захисту 1500 грн/га експлуатація зношених насадок із перевитратою 10% генерує прямі фінансові втрати у розмірі 150000 грн на кожні 1000 га обробленої площі, що у 20...25 разів перевищує суму закупівлі нового комплекту полімерних розпилювачів вартістю 6000...8000 грн [3, 27].

Доведено, що дотримання регламенту своєчасної заміни (до 300 годин напрацювання) є головним інструментом забезпечення екологічної безпеки. Стабілізація геометрії щілини радикально знижує індекс потенціалу дрейфу DPI, блокуючи неконтрольовану генерацію ультрадрібних крапель діаметром менше 100 мкм та усуваючи ризик нецільового токсичного забруднення суміжних агробіоценозів [11, 14].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Експериментально доведено та математично описано процес нелінійної гідроабразивної деградації полімерних щілинних розпилювачів. Встановлено, що критична деформація вихідного отвору (еліптичної щілини) настає через 23,5 годин стендового напрацювання. Ця точка є межею працездатності, після якої відбувається синхронний перетин максимально допустимих агротехнічних нормативів: похибка секундної витрати Δq перевищує 10%, а коефіцієнт варіації поперечного розподілу CV стрімко зростає до 12,1% [4, 21].

Шляхом перерахунку стендового часу обґрунтовано жорсткий інженерний регламент планової заміни робочих органів: їхній граничний ресурс становить 250...300 годин реальної польової експлуатації. Дотримання цього регламенту є ключовим фактором стабілізації спектра крапель, що дозволяє заблокувати неконтрольовану генерацію ультрадрібних фракцій (діаметром менше 100 мкм) та мінімізувати екологічний індекс потенціалу дрейфу DPI [11, 24].

Доведено, що зношення розпилювачів є прямим каталізатором підвищення рівня професійної небезпеки та аварійності. Спроби операторів компенсувати втрату якості розпилу ручним втручанням під залишковим тиском 300...500 кПа є головним тригером гострих отруєнь. Для усунення цих ризиків інтегровано протокол використання закритих систем перекачування (CTS), а поліацеталеві насадки після 300 годин напрацювання класифіковано як небезпечні відходи, що вимагають обов'язкової лужної дезактивації [7, 14, 27].

Розраховано та підтверджено абсолютну комерційну безальтернативність превентивного оновлення насадок. Затримка їхньої заміни генерує гарантовані збитки від 10% перевитрати хімікатів на суму 150000 грн на кожні 1000 га оброблених площ (за середньої вартості захисту 1500 грн/га). Цей обсяг втрат у 20...25 разів перевищує разові інвестиції в придбання нового комплекту розпилювачів (6000...8000 грн), що повністю доводить економічну доцільність впровадження розроблених технологічних рішень [3, 27].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вовк М. В. Мобільний додаток для всіх : кваліфікаційна робота на здобуття ступеня бакалавра за спеціальністю 208 «Агроінженерія» / Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2024. 72 с. URL: http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/45907.
2. Кобець О. М., Давиденко І. С., Тонкоголос І. Р. Ресурсні дослідження відцентрових розпилювачів, виготовлених з різних матеріалів. *Інженерія природокористування*. 2015. № 2. С. 96–100. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2015_2_15.
3. Макаренко Д. О., Дриваль С. В. Вибір розпилювачів TeeJet для підвищення ефективності роботи польових обприскувачів. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2026. № 50. С. 266–274. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2026-1-36.
4. Методика проведення експериментальних досліджень технічного стану щілинних гідравлічних розпилювачів самохідних обприскувачів / В. Мельник, К. Сировицький, М. Шуляк, О. Панкова. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. 2021. № 1. С. 48–56. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.1.07.
5. Панкєєв П. М. Обґрунтування параметрів та дослідження обертового розпилювача агрохімікатів : випускна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 «Агроінженерія» / Дніпровський державний аграрно-економічний університет. Дніпропетровськ, 2021. 97 с. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/server/api/core/bitstreams/5b417c78-916f-444b-acf3-ff0330e10ddb/content.
6. Субр А., Мілановський М., Парафінюк С. Вплив стану та типу форсунки на якість розпилення на рослинах пшениці. *Управління сільськогосподарською технікою та процесами у сталому сільському господарстві. FMPMSA 2022* / за ред. С. Паскуцці, Ф. Санторо. Cham : Springer, 2023. Т. 289. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-13090-8_14.

7. Тимочко В., Городецький І., Березовецький А., Войналович В., Вісин О. Оцінка професійного ризику працівників хімічного захисту рослин обприскуванням. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 26. С. 185–194. DOI: https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.185.
8. Ballal K., Krishnan P., Kemble J., Issler A. Nozzle selection and replacement based on nozzle wear analysis. *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture* (Madison, WI, USA, 23−26 June 1996). Madison, 1996. P. 795–804. DOI: https://doi.org/10.2134/1996.precisionagproc3.c94.
9. Bolat A., Ozluoymak O. B., Bayat A. Determination of spray performance of new and worn flat fan nozzles and spray angle based on novel image analysis software. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2021. Vol. 30. P. 8532–8540.
10. Broniarz-Press L., Włodarczak S., Matuszak M. et al. The effect of orifice shape and the injection pressure on enhancement of the atomization process for pressure-swirl atomizers. *Crop Protection*. 2016. Vol. 82. P. 65–74. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.01.005.
11. Bueno M. R., Cunha J. P. A. R., Santana D. G. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 154. P. 35–45. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.017.
12. Butler Ellis M. C., Tuck C. R. How adjuvants influence spray formation with different hydraulic nozzles. *Crop Protection*. 1999. Vol. 18, Iss. 2. P. 101–109. DOI: https://doi.org/10.1016/S0261-2194(98)00097-0.
13. Chapple A. C., Downer R. A., Hall F. R. Effects of spray adjuvants on swath patterns and droplet spectra for a flat-fan hydraulic nozzle. *Crop Protection*. 1993. Vol. 12, Iss. 8. P. 579–590. DOI: https://doi.org/10.1016/0261-2194(93)90120-8.
14. Chen C., Li S., Wu X. et al. Analysis of droplet size uniformity and selection of spray parameters based on the biological optimum particle size theory. *Environmental Research*. 2022. Vol. 204, Part B. Art. 112076. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112076.

15. Chen C., Li S., Wu X. et al. Construction of a theoretical model for fan nozzles with precise atomization angles for plant protection. *Chemosphere*. 2022. Vol. 287, Part 2. Art. 132017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132017.
16. Chen H., Duan R., Wang Q. et al. Effects of structural parameters of the fan nozzle on droplet spatial distribution. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37, Iss. 11. Art. 113319. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0304086.
17. Chen H., Duan R., Wang Q. et al. Research on the spray characteristics of the fan nozzle based on coupled analysis of the internal and external flow fields. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37, Iss. 6. Art. 065163. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0272573.
18. Dorr G. J., Hewitt A. J., Adkins S. W. et al. A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles. *Crop Protection*. 2013. Vol. 53. P. 109–117. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.017.
19. Evaluation of fan-pattern spray nozzle wear using scanning electron microscopy / C. R. Krause, D. L. Reichard, H. Zhu et al. *Scanning*. 2006. Vol. 25, Iss. 1. P. 8–11. DOI: https://doi.org/10.1002/sca.4950250103.
20. Forney S. H., Luck J. D., Kocher M. F., Pitla S. K. Laboratory and full boom-based investigation of nozzle setup error effects on flow, pressure, and spray pattern distribution. *Applied Engineering in Agriculture*. 2017. Vol. 33. P. 641–653. DOI: https://doi.org/10.13031/aea.12043.
21. Griesang F., Spadoni A. B. D., Ferreira P. H. U., Ferreira M. C. Effect of working pressure and spacing of nozzles on the quality of spraying distribution. *Crop Protection*. 2022. Vol. 151. Art. 105818. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105818.
22. Krishnan P., Evans T., Ballal K., Kemble L. J. Scanning electron microscopic studies of new and used fan nozzles for agricultural sprayers. *Applied Engineering in Agriculture*. 2004. Vol. 20. P. 133–138. DOI: https://doi.org/10.13031/2013.15881.
23. Li S., Chen C., Wang Y. et al. Study on the Atomization Characteristics of Flat Fan Nozzles for Pesticide Application at Low Pressures. *Agriculture*. 2021. Vol. 11, Iss. 4. Art. 309. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture11040309.

24. Milanowski M., Subr A., Parafiniuk S. Evaluation of Different Internal Designs of Hydraulic Nozzles under an Accelerated Wear Test. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Iss. 2. Art. 889. DOI: https://doi.org/10.3390/app12020889.

25. Nuyttens D., Taylor W. A., De Schampheleire M. et al. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. *Biosystems Engineering*. 2009. Vol. 103, Iss. 3. P. 271–280. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.001.

26. Sayinci B. Effect of strainer type, spray pressure, and orifice size on the discharge coefficient of standard flat-fan nozzles. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2015. Vol. 39, Iss. 5. P. 692–704. DOI: https://doi.org/10.3906/tar-1410-89.

27. Spray nozzle wear effects on droplet population / F. H. R. Baio, A. R. A. Zanin, L. P. R. Teodoro et al. *Engenharia Agrícola*. 2022. Vol. 42, Iss. 4. Art. e20220070. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v42n4e20220070/2022.

28. Thompson J. C., Rothstein J. P. The atomization of viscoelastic fluids in flat-fan and hollow-cone spray nozzles. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 147, Iss. 1–2. P. 11–22. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2007.06.004.

29. Tuck C. R., Butler Ellis M. C., Miller P. C. H. Techniques for measurement of droplet size and velocity distributions in agricultural sprays. *Crop Protection*. 1997. Vol. 16, Iss. 7. P. 619–628. DOI: https://doi.org/10.1016/S0261-2194(97)00053-7.

30. Zhang R., Hu P., Li L. et al. Fine-grained method for determining size and velocity distribution patterns of flat-fan nozzle-atomised droplets based on phase doppler interferometer. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 225. Art. 109343. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109343.

ДОДАТКИ