

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Сировицький Кирило Геннадійович



УДК 631.34: 631.333 +
631.314: 539.21

**ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗПИЛЮВАЧІВ ДЛЯ ХІМІЧНОГО
ЗАХИСТУ РОСЛИН**

Спеціальність 05.05.11 – Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному біотехнологічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Шуляк Михайло Леонідович**, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, перший проректор з НПР.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Шейченко Віктор Олександрович**, Полтавський державний аграрний університет, професор кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту;

доктор технічних наук, професор **Цуркан Олег Васильович**, Вінницький національний аграрний університет, директор Відокремленого структурного підрозділу «Ладижанський фаховий коледж».

Захист відбудеться 14 жовтня 2026 року об 11.00 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 23.073.01 при Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією та авторефератом можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий 9 вересня 2026 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 23.073.01



Каліч В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення ефективності хімічного захисту рослин є одним із ключових завдань сучасного аграрного виробництва, особливо в умовах переходу господарств до технологій точного землеробства та необхідності скорочення витрат пестицидів. Центральним елементом технологічного процесу внесення хімічних засобів є гідравлічні розпилювачі, технічні параметри яких безпосередньо визначають рівномірність покриття рослинного покриву, дисперсний склад крапель, величину дрейфу та загальну біологічну ефективність обробітки. Будь-які відхилення у роботі розпилювачів здатні призвести до перевитрати робочих розчинів, неконтрольованого переносу препарату за межі поля, забруднення довкілля та економічних втрат.

У реальних виробничих умовах технічні параметри розпилювачів змінюються під впливом інтенсивного абразивного зношування, коливань тиску в магістралях, змін в'язкості та густини робочих рідин, а також через забруднення вихідних отворів. Наявні методи контролю – візуальний огляд або періодичний вимір витрати – не забезпечують необхідної діагностичної інформативності та здатності виявляти початок деградаційних процесів. Це створює об'єктивну потребу у розробленні науково-обґрунтованих методів діагностування, які б дозволяли оперативно оцінювати технічний стан гідравлічних розпилювачів та прогнозувати зміну їх параметрів у процесі експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими темами та програмами. Робота виконана у відповідності до вимог законів України «Про продовольчу безпеку України» № 4344-VI від 07.02.2012 р. і «Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу» № 5478-VI від 06.11.2012 р., а також погоджена з такими загальними державними науковими програмами: Постанова Президіуму НАН України № 55 від 05.12.2009 р. «Основні наукові напрямки, найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природних, технічних і гуманітарних наук на 2009-2013 роки»; Постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 07.09.2011 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямків в наукових дослідженнях і науково-технічних розробок до 2015 року»; програмою НААН України «Пріоритетні завдання аграрної науки України» (період 2008-2015 рр., п. 6.3.3 Розроблення та вдосконалення екологічно безпечних способів і технічних засобів для хімічного захисту рослин, що передбачають економію технологічних матеріалів і високу адаптацію до зміни метеорологічних умов); програмою НААН України «Стратегічні напрями розвитку сільського господарства України на період до 2020 року»; Постановою Президії НААН України «Про пріоритетні напрями наукових досліджень НААН України на 2026-2030 роки»; розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 листопада 2024 р. № 1163-р «Про схвалення Стратегії розвитку сільського господарства та сільських територій в Україні на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках»; НДР «Дослідження впливу технічного стану гідравлічних розпилювачів

обприскувача на якість виконання технологічної операції обприскування» (ГДТ № 6-11 від 10 листопада 2023 р., Сумський НАУ, м. Суми).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності хімічного захисту рослин шляхом обґрунтування методу діагностування технічних параметрів сільськогосподарських гідравлічних розпилювачів у процесі їх експлуатації.

Для реалізації поставленої мети в роботі розв'язувалися наступні завдання:

- проаналізувати стан питання щодо існуючих методів, діагностичних засобів оцінки стану гідравлічних розпилювачів та визначити показники їх технічного стану, що мають найбільший вплив на ефективність хімічного захисту рослин при їх експлуатації;

- розробити математичну модель робочого процесу гідравлічного розпилювача, яка враховує зміну геометрії сопла внаслідок абразивного зношення, коливання тиску та фізико-хімічні властивості робочої рідини;

- провести імітаційне моделювання гідродинамічних процесів у соплі розпилювача та визначити вплив зміни геометрії сопла на формування факелу розпилю та обґрунтувати параметри, що забезпечують сучасні вимоги до якості розподілу рідини по поверхні обробки;

- розробити методику та створити експериментальний стенд для дослідження рівномірності розподілу робочої рідини по поверхні обробки при моделюванні різних ступенів зносу гідравлічних розпилювачів;

- експериментально оцінити вплив геометрії сопла гідравлічних розпилювачів на рівномірність розподілу рідини по поверхні обробки, на підставі чого розробити рекомендації щодо видалення з експлуатації розпилювачів, технічні параметри яких досягли граничного стану або меж працездатності.

Об'єктом дослідження є технологічний процес розподілу рідких засобів хімічного захисту по поверхні рослин, технічний стан та гідродинамічні характеристики гідравлічних розпилювачів.

Предметом дослідження є взаємодія сопла розпилювача із рідиною, вплив його геометричних характеристик на показники ефективності технологічного процесу.

Методи дослідження. в роботі використано аналітичні та теоретичні методи, системний аналіз конструкцій і принципів роботи гідравлічних розпилювачів, порівняльний аналіз існуючих методів контролю технічних параметрів, математичне моделювання процесів гідродинаміки, методи інструментальних вимірювань, лабораторні та стендові випробування розпилювачів з різним ступенем зношування, методи статистичної обробки даних, кореляційний та регресійний аналіз, встановлення залежностей між технічними параметрами і результатами експлуатації. Математичне моделювання, теоретичні дослідження та обробка результатів наукових досліджень виконані з використанням програмного забезпечення Solidworks, Simcenter STAR-CCM+ 2022.1.1, Computational Fluid Dynamics (CFD) software та Microsoft Office.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- встановлено систему аналітичних залежностей між геометричними параметрами сопла та формою факела, якими враховано дисперсний склад (діаметр) крапель, їхню початкову швидкість, коефіцієнт витрати та кут факела розпилю;

- аналітично обґрунтовано та експериментально підтверджено вплив на характер розподілу робочої рідини змінних параметрів сопла гідравлічного розпилювача, що уможливило встановити межі його справного та працездатного станів.

Отримало подальший розвиток:

- спосіб визначення закономірностей впливу експлуатаційних факторів на характеристики розпилення та технічний стан гідравлічних розпилювачів, який, на відміну від відомих, дозволяє враховувати динаміку зміни геометричної форми сопла в процесі його деградації.

Удосконалено:

- метод та системно обґрунтовано вплив експлуатаційних факторів на характеристики розпилення та технічний стан гідравлічних розпилювачів, який базується на результатах моделювання гідродинаміки факела розпилю і враховує динаміку змінення геометричної форми сопла в процесі його експлуатації.

- метод експериментального визначення характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку, який підвищує точність вимірювань і базується на ваговому контролі рідини на кожній елементарній ділянці поверхні.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та впровадженні комплексу технічних, методичних і програмно-імітаційних рішень, спрямованих на суттєве підвищення якості, екологічної безпеки та економічної ефективності виконання технологічної операції внесення засобів захисту рослин шляхом оперативного інструментального контролю геометрії розпилювачів. Головним практичним здобутком є створення інноваційного лабораторно-технічного стенда та удосконаленого методу експериментального визначення розподілу робочої рідини, який, завдяки впровадженню вагового контролю на кожній елементарній ділянці, забезпечує підвищену точність вимірювань і дозволив виявити осередки концентрації розчину. На основі обґрунтованої аналітичної моделі гідродинаміки, яка комплексно враховує діаметр крапель, їхню початкову швидкість, коефіцієнт витрати і кут факела розпилю, та верифікованої імітаційної CFD-моделі, встановлено чіткі інженерні рекомендації щодо покрокового відбракування зношених розпилювачів. Завдяки розвитку методологічних основ, що враховують динаміку деградації форми сопла, та доведеній гіперчутливості системи до зношення, визначено межі його станів за критерієм граничного коефіцієнта варіації: область справного стану ($a = 0,630-0,682$ мм, $CV \leq 10$ %), працездатного з необхідністю заміни у короткий термін ($a = 0,682-0,709$ мм, $CV = 10-15$ %) та непридатного стану ($a > 0,709$ мм, $CV > 15$ %). Експериментально доведено неефективність способу компенсації зношення сопел шляхом зміни режимів роботи

обприскувача (тиску, швидкості чи висоти штанги), що обґрунтовує обов'язковість регулярних інспекцій за розробленою та валідованою експрес-методикою аналізу 1/2 поверхні обробітку, яка суттєво скорочує час проведення контролю і повністю підтвердила свою ефективність під час польових випробувань для збереження нормативної рівномірності покриття.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі на кафедрі агроінжинірингу Сумського національного аграрного університету при викладанні освітніх компонентів: «Експлуатація машин і обладнання», «Сільськогосподарські машини», «Гідро-, пневмо- електросистеми агромашин», «Інформаційні технології, штучний інтелект та системи точного землеробства», «Теорія і технологія наукових досліджень» для спеціальностей Н7 «Агроінженерія» та G11 «Галузеве машинобудування» за наступними освітньо-професійними програмами: ОПП «Агроінженерія» першого (бакалаврського) ступеня вищої освіти, ОПП «Системи точного землеробства» другого (магістерського) ступеня вищої освіти та ОНП «Галузеве машинобудування» третього (освітньо-наукового) ступеня вищої освіти.

На основі комплексного аналізу технологічних операцій захисту рослин теоретично обґрунтовано та практично реалізовано метод оперативного діагностування щільних гідравлічних розпилювачів, геометричні зміни сопла яких є визначальними для якості виливу і не можуть бути компенсовані налаштуваннями обприскувача. Шляхом поєднання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та натурних випробувань на розробленому лабораторному стенді досліджено осередки концентрації рідини й отримано економічний ефект від впровадження розроблених рішень у СТОВ «Промінь», ФГ «РЕЇНЦІ» та ТОВ «Сі-Ен-Ейч Індастріал Україна» у розмірі 353 тис. грн поряд із повною інтеграцією результатів у навчальний процес СНАУ.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, експериментальні дослідження та розрахунки за темою дисертації автором виконано самостійно. Підготовлено матеріали досліджень до публікації, організовано промислову апробацію розробленої технології. Автору належать основні ідеї в опублікованих працях. Виконано критичний аналіз та узагальнення результатів проведених теоретичних і експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались: на щорічних МНПК «Технічний прогрес в АПК» - ХНТУСГ ім. П. Василенка, м. Харків, Україна, 2011-2026 рр.; на IX-тій МНПК «Проблеми конструювання, виробництва і експлуатації сільськогосподарської техніки» - КНТУ, м. Кіровоград, Україна, 2013 р.; на Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні розробки в аграрній сфері» 30 листопада 2017 р. Харків: ХНТУСГ; на Міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки": присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 17-18 жовтня 2020 р. Харків; на науково-практичній конференції викладачів, аспірантів і студентів Сумського НАУ – СНАУ, м. Суми, Україна, 2013-2015 рр.; на Міжнародній науково-технічній конференції «Крамаровські

читання» з нагоди 115-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 24-25 лютого 2022 р., м. Київ; на Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в Індустрії» - СНАУ, м. Суми, Україна, 2018-2024 рр.

Публікації Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 14 наукових працях, у тому числі: 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях (з них 1 стаття у виданні, що включено до міжнародної наукометричної бази даних Scopus), 7 тез у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 1 патент.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 159 сторінок, у тому числі 5 додатків на 8 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 140 сторінок, 59 рисунків та 22 таблиць. Список використаних джерел нараховує 112 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, мету, завдання дослідження, об'єкт і предмет досліджень, описано використані методи і методики досліджень та зв'язок роботи з науковими програмами, визначено наукову новизну і практичну цінність, наведено дані щодо апробації основних положень дисертаційного дослідження та загальна характеристика роботи.

В **першому розділі** «Огляд літератури за темою дисертації та вибір напрямку досліджень» проведено аналіз та узагальнено науково-технічні джерела за темою дисертаційного дослідження.

Одним із найважливіших сучасних завдань агроінженерії є підвищення якості хімічного захисту рослин при переході до мінімальних і ресурсозберігаючих технологій обробки ґрунту. Ефективність внесення пестицидів визначається нормою витрати рідини, густотою покриття та рівномірністю її розподілу по ширині захвату штанги обприскувача, де основним робочим органом виступає гідравлічний розпилювач. Найпоширенішим типом сопел є щілинні розпилювачі, які сумісні з сучасними системами імпульсно-широтної модуляції (PWM) та забезпечують високу якість покриття. Причина дослідження якісних показників і деградації розпилювачів – це необхідність запобігання втратам робочої рідини, зменшення дрейфу (знесення крапель вітром) та забезпечення екологічної безпеки під час проведення польових обробок. У сучасній науковій літературі дослідники описують гідродинаміку розпаду струменя та процеси деградації сопел математичними рівняннями та експериментальними залежностями. Дослідженню та вивченню функціонування, зношення та діагностування розпилювачів присвячено наукові праці вітчизняних дослідників: В.І. Мельника, А.С. Кобця, О.М. Кобця, Б.В. Онищенко, В.В. Погорілого, а також зарубіжних науковців та міжнародних організацій (ASABE, ISO, FAO).

В результаті проведеного аналізу методів моделювання, дослідження та діагностування розпилювачів науковцями були використані як класичні

стандартизовані підходи (патернатори ISO 5682 з канавками 50 мм), так і сучасні оптико-лазерні системи (PDPA, PIV/PLIF, Oxford VisiSizer) та CFD-моделювання. Проте ці методи мають ряд недоліків для використання на практиці:

- лабораторні стенди з мірними циліндрами та класичні патернатори потребують значного часу, є ресурсномісткими та викликають простої техніки в розпал польових робіт;

- складні математичні CFD-моделі й оптичні лазерні комплекси (PDPA, PIV) призначені виключно для стаціонарних наукових лабораторій і занадто складні та дорогі для практичного застосування безпосередньо в аграрних підприємствах;

- існуючі методи обмежуються оцінкою хвилинної витрати та геометрії факела в лабораторному об'ємі, але не дозволяють досліджувати якісні показники розпилення безпосередньо на оброблювану поверхню (листок рослини);

- спроби компенсувати зношення сопел технологічними налаштуваннями (змінюючи тиск чи швидкість) не усувають геометричних дефектів сопла і призводять до зміщення спектра крапель та підвищеного дрейфу.

Провівши аналіз результатів наукових досліджень і засобів діагностування, встановлено, що виникає необхідність у розробці ефективної, малоресурсоемкісної методики та мобільного апаратно-конструктивного забезпечення для експрес-діагностування щілинних розпилювачів. Це дозволить встановити чіткі взаємозв'язки між ступенем деградації соплового отвору та якістю захисту рослин і характеризувати справний і граничний стани розпилювачів (за обмеженням $CV \leq 15\%$) безпосередньо на поверхні листка в умовах реального господарства.

У другому розділі «Моделювання гідродинаміки факела розпилю щілинного гідравлічного розпилювача» виконано аналіз впливу геометричних параметрів і деградації соплового отвору на рівномірність розподілу робочої рідини по поверхні обробітку.

Представлений підхід при моделюванні факелу розпилю має перевагу над іншими експериментальними методами (розділ 1), оскільки дозволяє кількісно оцінити розподіл рідини по поверхні обробітку, але потребує значних витрат часу при проведенні експериментальних досліджень.

Для теоретичного опису гідродинаміки факела розпилю реальний гетерогенний потік замінюється взаємопроникними континуумами (фазами): суцільною газовою фазою та дисперсними фракціями крапель. Закони збереження маси й імпульсу, сформульовані у диференціальній формі для стаціонарного руху нестисканих фаз, визначають динаміку потоку вздовж ліній струмків через частки об'єму (порізність) та систему діючих сил. В основній ділянці факела градієнтом статичного тиску зневажають, що дозволяє звести канонічне рівняння руху краплинної фази до балансу гравітаційних сил і міжфазного гідродинамічного опору.

Оцінка додаткових факторів показала, що ефекти приєднаної маси та сили Бассе-Бусинеска є несуттєвими через малу щільність повітря порівняно з

рідиною, а вторинне дроблення й коалесценція не мають вирішального впливу внаслідок стрімкого падіння концентрації крапель при віддаленні від сопла. Основним визначальним чинником є сила міжфазного опору, обчислення якої вимагає точного вибору коефіцієнта опору з урахуванням неусталеності обтікання, турбулентності та деформації крапель. Для розрахунку цього коефіцієнта в розробленій моделі обґрунтовано застосування рівняння Ривкінда-Рискіна.

Вільним будемо називати факел, що рухається в просторі за відсутності перешкод, що його обмежують (у тому числі і сусідніх факелів розпилу).

У найбільш загальному випадку сукупність дисперсних частинок, що випромінюються точковим джерелом (розпилювачем), поширюється всередині об'єму викривленого конуса, як показано на (рис. 1).

Елементарний струмок, який в початковий момент часу ділить кореневий кут навпіл, назвемо центральним (лінія ON_2). Розглянемо об'єм факела, укладений між двома близькими площинами, для кожної з яких центральна лінія потоку є нормаллю. Площина ZOX містить більший радіус еліпсоїда R_n .

Припустимо, що переріз факела нормальною площиною є опуклою фігурою. Тоді об'єм «зрізу» факела між двома площинами може бути обчислений як об'єм $dV = S d_n$ (де d_n – відстань між центрами опуклих фігур).

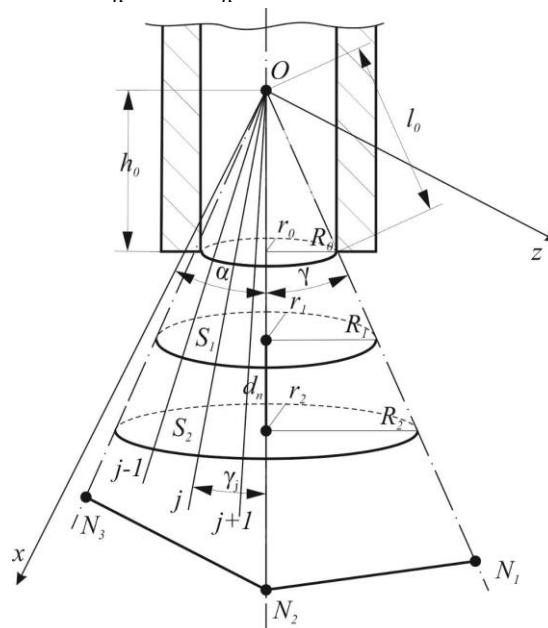


Рисунок 1 – Розрахункова схема вільного факела щілинного розпилювача: визначення габаритів факела; розбивка перерізу факела на струмки потоку

Перетин факела зручно визначити як сукупність точок рідкої фази, що одночасно і з однаковою швидкістю покинули розпилювач. Оскільки, розглядається розпилювання щілинним розпилювачем, то через форму соплового отвору рідина покидає отвір ламінарним потоком з епюрною швидкістю у вигляді еліпсоїда. Геометрію розпилювача щілинного розпилювача було створено за допомогою CAD Solidworks.

При імпорті CAD-моделі в ANSYS CFD геометрію розпилювача та сопла було розбито на окремі області для локального контролю розміру комірок, а також розроблено й порівняно "грубу" і "дрібну" сітки. Дослідження показало суттєвий

вплив дисперсності сітки на точність відстеження межі розділу фаз: збільшення розміру комірок штучно розширює кут розпилення через погіршення роздільної здатності на межі фаз, тоді як найкращі результати візуалізації факела забезпечила обрізана сітка з локальним згущенням навколо сопла.

Для забезпечення стійкості розрахунку за умовою CFL нестационарне моделювання з урахуванням гравітації та k -моделі турбулентності виконували на урізаній (trimmed) сітці зі зменшеним кроком за часом. Для мінімізації обчислювальних витрат візуалізацію факела здійснювали за допомогою пасивного скаляра, де дрібна сітка забезпечила точне відтворення межі фаз і кута розпилу. З аналізу 3D-моделі встановили, що експлуатаційне зношення сопла концентрується на ширині a , утвореній клином у зоні найменшої товщини стінки, тоді як довжина b , визначена циліндричним каналом, залишається незмінною, що дозволяє звести завдання моделювання до оцінки впливу деградації розміру a на характер виливу. Припущення про визначальну деградацію ширини a підтверджено аналізом геометрії соплових отворів розпилювачів із різним експлуатаційним напрацюванням. Це дозволило спростити задачу імітаційного моделювання до встановлення прямої залежності між зміною розміру a та рівномірністю розподілу рідини, для чого розроблено геометричні моделі чотирьох типорозмірів сопла (табл. 1).

Таблиця 1 – Лінійні розміри геометрії соплових отворів розпилювачів з імітацією різного ступеню зношення

№ геометрії	1	2	3	4
Ширина (a), мм	0,63	0,67	0,71	0,75
Довжина (b), мм	2,65	2,65	2,65	2,65

Проведене моделювання характеру розподілу рідини у факелі розпилення для геометрій 1-4 наведені на (рис. 2).

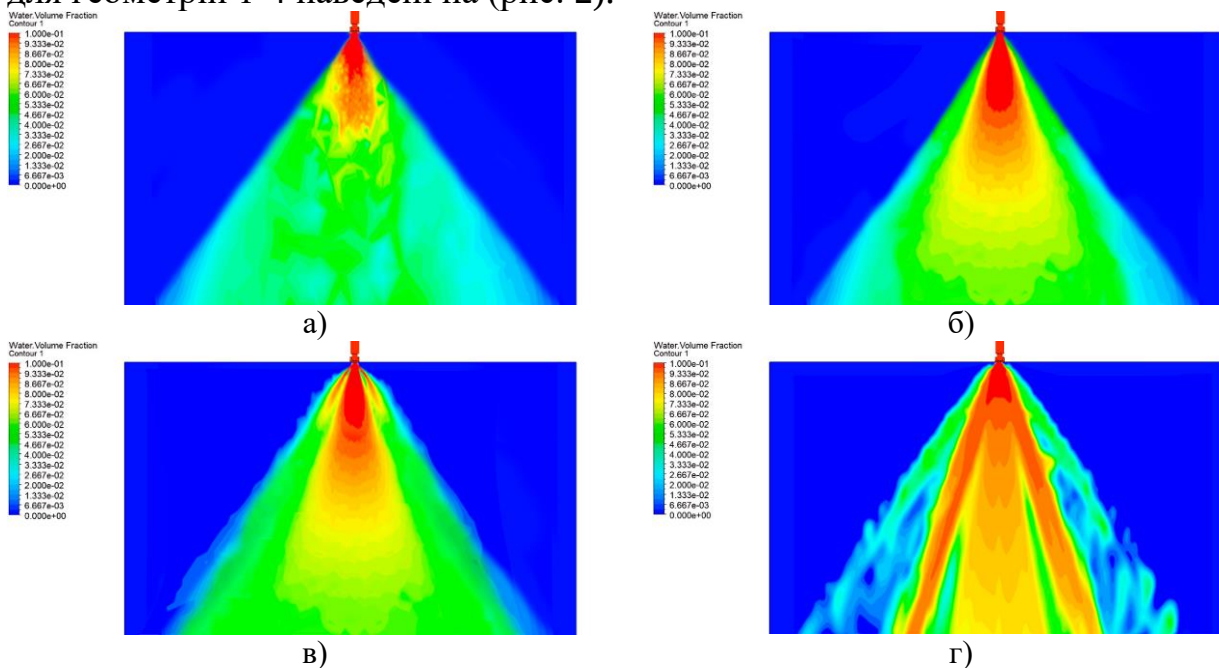


Рисунок 2 – Імітаційне моделювання розпилення робочої рідини щільними розпилювачами при зміні лінійного розміру (a) соплового отвору: а) 0,63 мм; б) 0,67 мм; в) 0,71 мм; г) 0,75 мм

Збільшення ширини соплового отвору a лише на 6 % спричиняє зростання нерівномірності та фрагментацію факела на три окремі струмені з утворенням осередків перевитрати рідини. Для балансу між точністю й обчислювальними ресурсами (з огляду на обмеження за числом Куранта та дрібністю сітки) розрахунок проведено на оптимально укрупненій сітці, що дозволило достовірно оцінити загальні тенденції виливу. За отриманими профілями виливу та методикою суміщення сусідніх факелів розраховано сумарні значення коефіцієнта варіації CV, а залежність CV від розміру a (рис. 3) апроксимовано параболічним рівнянням вида:

$$CV = 1511,3 \cdot a^2 - 1930,2 \cdot a + 622,14 \quad (1)$$

Якщо на (рис. 4) накреслити пряму, що відповідатиме граничному значенню коефіцієнту варіації $CV = 15\%$, то при перетині нею оговорену залежність в точці О буде визначено максимальне значення $a_{\max} = 0,716$ мм, при якому зберігається працездатність розпилювача за параметром CV. Перпендикуляр, опущений на вісь, ординат дозволить окреслити область працездатного стану ОП розпилювача, в межах якої зміни a не матимуть суттєвого впливу на якість виконання операції захисту рослин. Натомість вихід за її межі характеризуватиме параметричну відмову і необхідність заміни розпилювача. Результати імітаційного моделювання витрати рідини G_{pid} та коефіцієнту варіації CV наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати імітаційного моделювання витрати рідини

Ширина соплового отвору a , мм	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,73	0,75
Витрата рідини G_{pid} , л/хв.	2,018	2,026	2,034	2,048	2,062	2,086	2,110
Коефіцієнт варіації CV, %	5,95	6,03	7,33	9,83	13,54	18,47	24,59

Аналіз результатів CFD-моделювання підтверджує непридатність загальної витрати рідини, як діагностичного параметра через її зміну менше ніж на 3%, що робить геометричну деградацію сопла єдиним вірним маркером параметричної відмови.

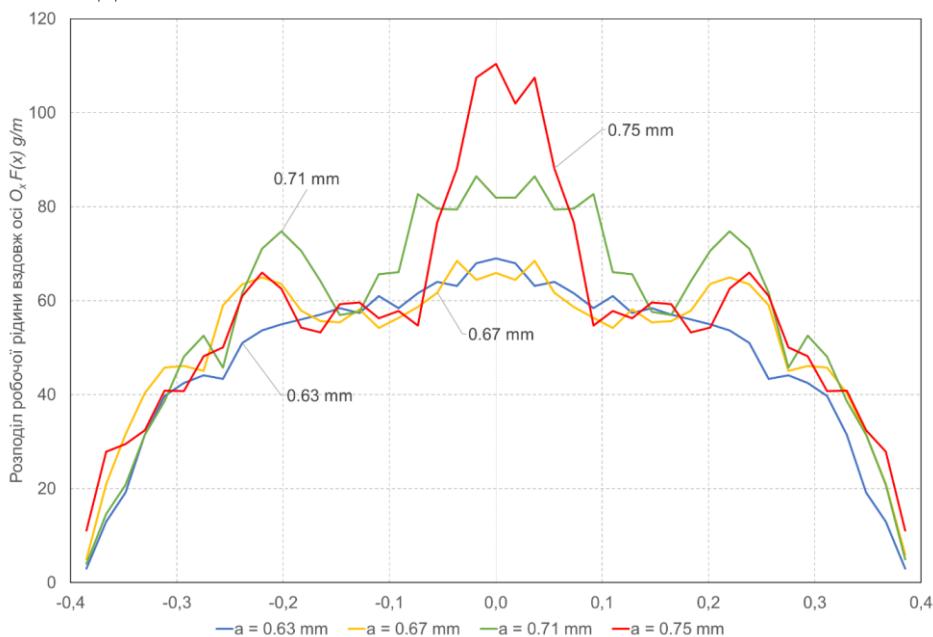


Рисунок 3 – Розподіл робочої рідини вздовж осі Ox при зміні лінійного розміру (a) соплового отвору

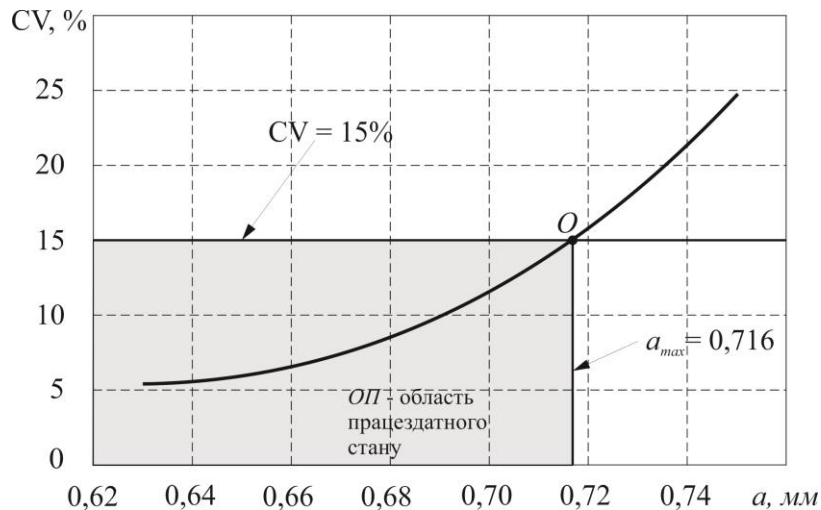


Рисунок 4 – Залежність зміни коефіцієнта варіації CV розподілу рідини по поверхні обробітку від зміни ширини соплового отвору (a) розпилювача

Методологічно доведено, що використання CFD із транспортним рівнянням пасивного скаляра ефективно відтворює загальну топологію факела, проте через значні вимоги до дискретизації сітки та обчислювальних ресурсів часові витрати на чисельний експеримент співмірні з натурними випробуваннями.

У **третьому розділі** «Програма та методика проведення експериментальних досліджень» наведено методику формування розмірних груп щілинних розпилювачів гідравлічного типу; обґрунтовано технічні та конструктивні параметри лабораторного станду для дослідження щілинних розпилювачів; приведено методику проведення експериментального дослідження щілинних розпилювачів; обґрунтовано методику прискореного аналізу характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку.

У **четвертому розділі** «Експериментальні дослідження та перевірка адекватності математичного моделювання роботи щілинного гідравлічного розпилювача» наведено результати досліджень, які є підтвердженням теоретичних залежностей та встановлені емпіричні зв'язки між характером зміни розподілу робочої рідини по поверхні обробітку за умови зміни геометрії соплового отвору розпилювача. У результаті проведення експериментальних досліджень, формування факелу робочої рідини для 1-4 груп розпилювачів, отримані поверхні розподілу рідини в межах площі матриці станду, які наведені на (рис. 5). При візуальному аналізі видно, що розподіл рідини по поверхні обробітку має характер подібний до отриманого при імітаційному моделюванні. Спостерігається збільшення нерівномірності та осередки концентрації рідини, які більш чітко ідентифікуються зі збільшенням розміру a (рис. 5 в, г). Наявне суттєве збільшення об'єму рідини у області центрального струменя (центрального піку). Також видно, що форма поверхні відклику дійсно може бути апроксимована за допомогою геометрії (правильної прямокутної піраміди).

При переході до кількісної оцінки розподілу рідини представимо отримані результати у вигляді сукупності ізоліній (рис. 6). Крива коефіцієнту варіації за експериментальними даними перетинає пряму граничного значення коефіцієнту варіації ($CV = 15\%$) раніше, ніж при моделюванні у точці O_1 , тому

максимальне значення $a_{\max}$ зменшується до 0,709 мм, як результат ОП також зменшується. Відповідне показує більш швидке досягнення межі коефіцієнта варіації для реальних розпилювачів.

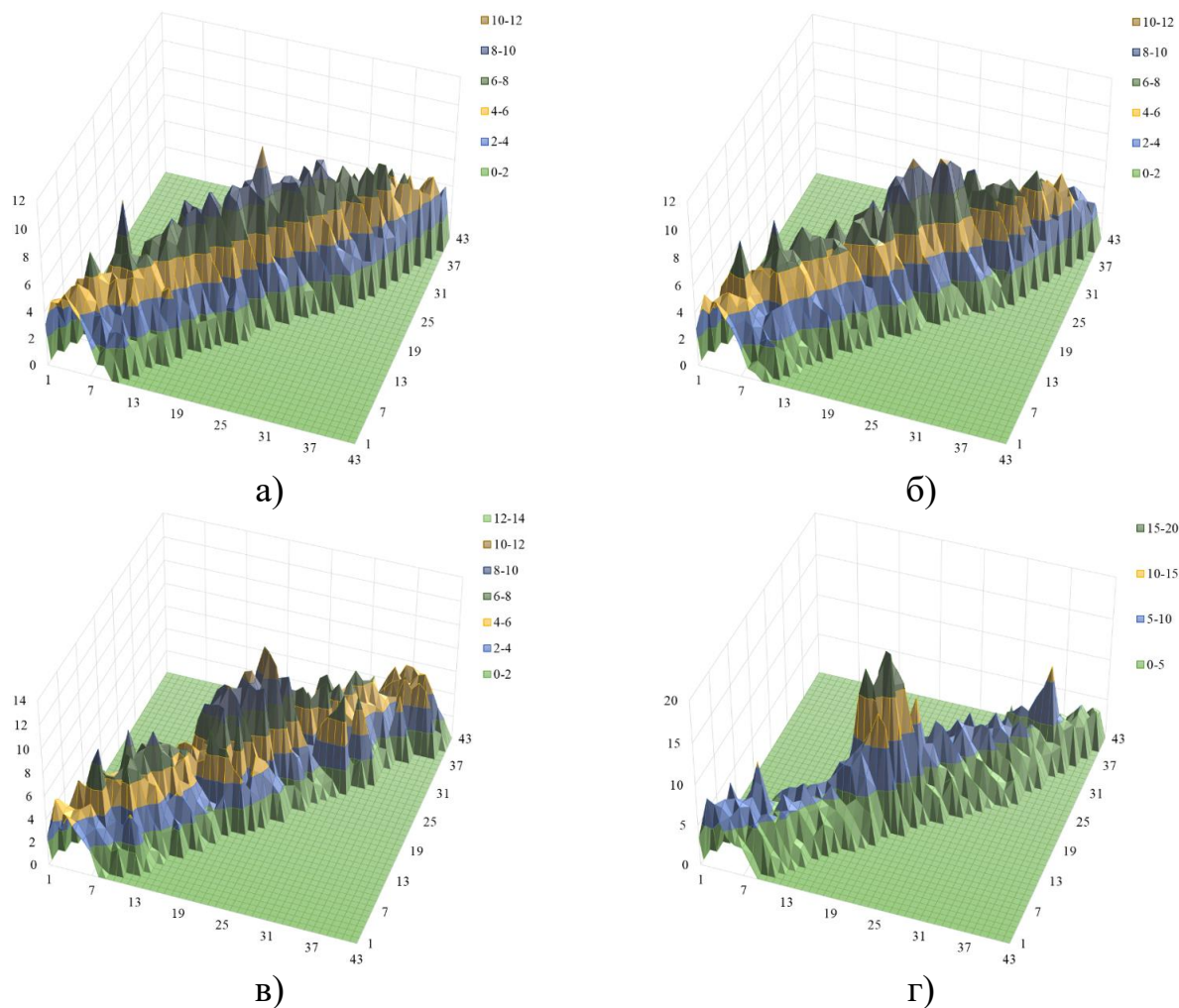


Рисунок 5 – Розподіл робочої рідини по поверхні обробітку для розпилювачів 4 груп:
1 група – $a = 0,63$ мм; 2 група – 0,67 мм; 3 група – 0,71 мм; 4 група – 0,75 мм

Якщо розглянути криву коефіцієнту варіації, то можна констатувати, що збільшення коефіцієнту варіації на початку процесу зношення характеризується меншою крутизною кривої, ніж у області за межами ОП. Якщо окремо апроксимувати ці дві ділянки лінійною залежністю, то отримає точку O_2 . При перенесенні цієї точки на криву CV (O'_2) проведемо перпендикуляри на осі абсцис і ординат. У результаті отримаємо область справного стану розпилювача ОС (рис. 7).

Загалом можна констатувати, що адекватність імітаційного моделювання була підтверджена, але з огляду на час проведення дослідження і проблеми з підвищенням його точності, при можливості проведення реального експерименту необхідно віддавати перевагу саме експерименту. Тому актуальним напрямком розвитку даного дослідження є вдосконалення методики прискореного аналізу та використання автоматичних систем для фіксації ваги рідини, що потрапляє на елементарні ділянки поверхні обробітку.

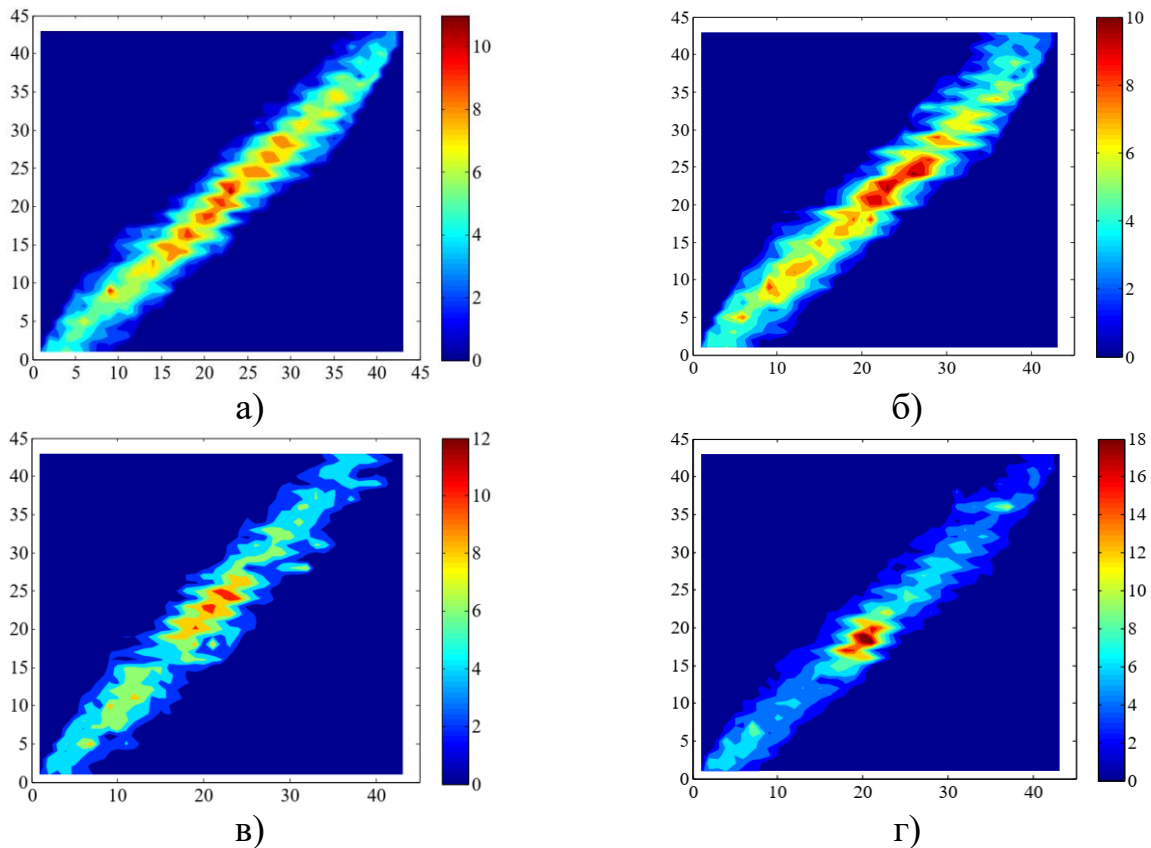


Рисунок 6 – Ізолінії розподілу робочої рідини по поверхні обробітку для розпилювачів 4 груп: 1 група – $a = 0,63$ мм; 2 група – $0,67$ мм; 3 група – $0,71$ мм; 4 група – $0,75$ мм

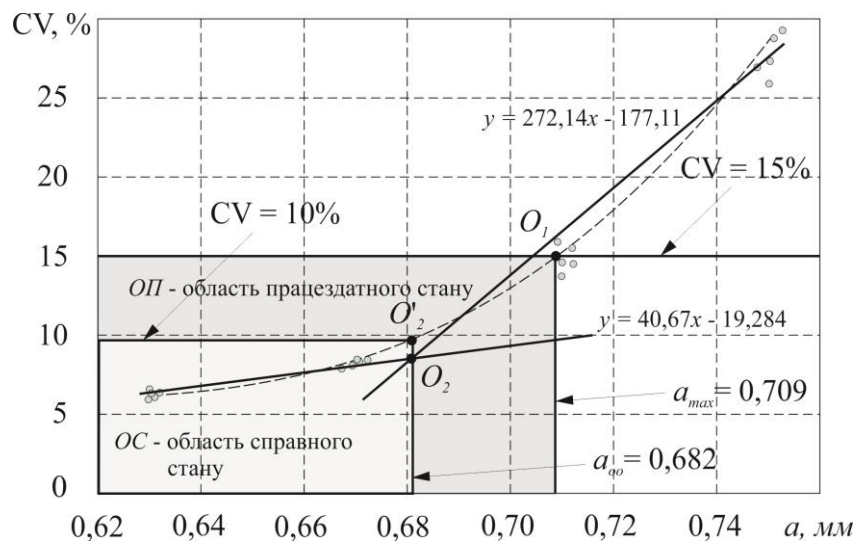


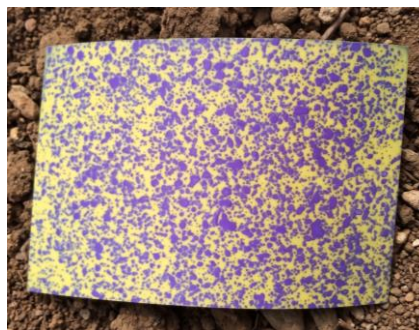
Рисунок 7 – Визначення області оптимальної роботи розпилювача

При аналізі джерел інформації у першому розділі виявлено, що більшість науковців при дослідженні розпилювачів обґрунтовують доцільність проведення лабораторних або стендових експериментів, як найбільш доцільних для вивчення якості розпилення. Тому для забезпечення можливості відтворення умов проведення експерименту дослідження якості розпилення необхідно проводити у лабораторних умовах. Об'єктом польових досліджень є обприскувач Case IH Patriot 3330 (рис. 8 а). Данна методика базується на використанні методики та водочутливого паперу (Water-Sensitive Paper) (рис. 8 б). Для визначення якості розпилення на штангу розпилювача було встановлено по п'ять розпилювачів кожної розмірної групи, далі по ширині

штанги, відповідно до ширини захвату кожної розмірної групи (2,5 м) були закріплені картки водочутливого паперу з кроком 25 см безпосередньо на ґрунті (рис. 8 в, г).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 8 – Проведення польових досліджень: а – обприскувач Case IH Patriot 3330, б – загальний вигляд водочутливого паперу; в – розміщення карток водочутливого паперу на ґрунті; г – встановлення технологічних параметрів обприскування

Результати досліджень показують, що розпилювачі I та II групи (ширина соплового отвору від 0,62 мм до 0,7 мм) повністю задовольняють вимогам еталонних норм покриття. Для III групи наявні відхилення від еталону у бік збільшення розмірів краплі та зменшення їх кількості на см^2 . Наявні картки, де кількість крапель не перевищує 40 крапель/ см^2 , що є неприйнятним результатом. Для IV групи тенденція погіршується – зафіксовані повністю сині картки, що демонструє перевитрату робочої рідини під центром розпилювача та у місцях накладання піків нерівномірності, на інших картках наявна недостатня кількість крапель, що унеможливує використання цих розпилювачів, навіть для ґрунтових гербіцидів. Картки IV групи мають щільність покриття меншу за 20 крапель/ см^2 . Результати польових експериментів підтверджують загальні рекомендації щодо придатності щілинних розпилювачів при зміні лінійного розміру соплового отвору а від 0,630 до 0,709 мм, подальше збільшення якого через зношення чи некоректну експлуатацію веде до суттєвого погіршення якості обприскування і вимагає термінової заміни розпилювача.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що техніко-технологічне забезпечення сучасних методів та підходів до проведення технологічних операцій захисту рослин не дають можливостей повною мірою здійснювати управління технічним станом гідравлічних розпилювачів і унеможливають підвищення економічних показників систем виробництва. За таких умов регулювання тиску, висоти штанги чи швидкості руху обприскувача не усуває геометричних змін його сопла і не відновлює властивостей розпилу. Пріоритетним напрямком виглядає розроблення та впровадження комплексу технічних, методичних і програмно-імітаційних рішень, спрямованих на суттєве підвищення якості, екологічної безпеки та економічної ефективності виконання технологічної операції внесення засобів захисту рослин шляхом оперативного інструментального контролю геометрії розпилювачів.

2. За результатами теоретичних досліджень:

- встановлено систему аналітичних залежностей між геометричними параметрами сопла та формою факела, якими враховано дисперсний склад (діаметр) крапель, їхню початкову швидкість, коефіцієнт витрати та кут факела розпилу;

- аналітично обґрунтовано та експериментально підтверджено вплив на характер розподілу робочої рідини змінних параметрів сопла гідравлічного розпилювача, що уможливило встановити межі його справного та працездатного станів, яку обмежує коефіцієнт варіації у 15 %.

3. Удосконалено метод, обґрунтовано параметри і режими роботи стенду для досліджень щільних розпилювачів гідравлічного типу, впровадження у якому вагового контролю на кожній елементарній ділянці, уможливило встановити чіткий взаємозв'язок між геометрією соплового отвору та якістю виконання технологічної операції захисту рослин.

4. Розвинуто методологічні основи закономірностей змінення форми сопла, доведено чутливість системи до зношення, за критерієм граничного коефіцієнта варіації визначено межі його станів: область справного стану (ширини соплового отвору a) – 0,630–0,682 мм, коефіцієнт варіації ≤ 10 %), працездатного з необхідністю заміни у короткий термін ($a = 0,682$ –0,709 мм, коефіцієнт варіації – 10–15 %), непрацездатний стан ($a > 0,709$ мм, коефіцієнт варіації > 15 %).

5. Імітаційним моделюванням обґрунтовано та експериментально підтверджено залежність розподілу робочої рідини по поверхні обробітку від геометрії соплового отвору розпилювача. Встановлено закономірності змінення коефіцієнта варіації розподілу рідин. За результатами перевірки адекватності імітаційного моделювання відзначено її статистичну значимість на рівні 0,05, за середньої похибки моделювання – 8,8 %, максимальної – 10,5 %.

6. Розкрито механіко-технологічні підстави забезпечення якості операції внесення засобів захисту рослин і на цій підставі експериментально доведено доцільність застосування методів діагностування 1/2 поверхні обробітку, що скоротило час проведення контролю і підтвердило ефективність за умов дотримання нормативної рівномірності покриття.

Річний економічний ефект від впровадження технічних, методичних і діагностичних рішень для щільних гідравлічних розпилювачів під час виконання технологічних операцій захисту рослин у СТОВ «Промінь» Роменського району Сумської області складав 120 тис. грн, у ФГ «РЕЇНЦІ» Первомайського району Миколаївської області – 98 тис. грн, а у ТОВ «Сі-Ен-Ейч Індастріал Україна» – 135 тис. грн.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття у періодичному науковому виданні, проіндексованому у наукометричній базі даних Scopus:

1. Efficient maize cultivation: pre-sowing seed inoculation system-optimal nozzle pressure and diameter / M. S. Shelest, M. L. Shuliak, A. O. Butenko, O. M. Bakumenko, V. M. Zubko, O. M. Datsko, I. M. Masyk, V. M. Yatsenko, **К. Н. Sirovitskiy**, S. V. Rieznik. *Agronomy Research*. 2024. Vol. 22, no. 2. P. 970–981.

(Здобувачу належить побудова і аналіз залежностей розподілу робочої рідини від тиску та форми сопла розпилювача).

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

2. **Сировицький К. Г.** (2026). Імітаційне моделювання розподілу робочої рідини в об'ємі факелу розпилювання щільної розпилювачі. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми : Вид-во СНАУ. Вип. 2 (64). С. 122-130. DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2026.2.18>.

3. **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л., Зубко В. М., Панкова О. В. (2025). Обґрунтування гідродинаміки факела розпилу щільної гідравлічної розпилювачі. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Вип. 3 (61). С. 142–150. DOI: <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.3.20>. *(Здобувачу належить математичне моделювання, CFD-моделювання та висновки).*

4. Мельник В. І., **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л., Панкова О. В. (2021). Методика проведення експериментальних досліджень технічного стану щільних гідравлічних розпилювачів самохідних обприскувачів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Харків : Вид-во НТУ «ХПІ». Вип. 1. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.1.07>. *(Здобувачу належить аналіз літературних джерел, узагальнення методики проведення дослідів та висновки).*

5. **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л., Мельник В. І. (2021). Результати досліджень технічного стану гідравлічних розпилювачів для захисту рослин. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми : Вид-во СНАУ. Вип. 2 (44). С. 41–44. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.9>. *(Здобувачу належить аналіз результатів досліджень та комп'ютерне моделювання).*

6. Мельник В. І., **Сировицький К. Г.**, Фатєєва Н. Ю. (2019). Аналіз конструкцій розпилювачів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Вип. 199. С. 359–365. *(Здобувачу належить систематизація інформації, обґрунтування конструкцій та висновки).*

7. Мельник В. І., **Сировицький К. Г.** (2013). Розпилювачі для хімічного захисту рослин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва*. Вип. 135. С. 95–101. *(Здобувачу належить аналіз основних технічних характеристик розпилювачів для хімічного захисту рослин).*

Тези і матеріали конференцій:

8. **Сировицький К. Г.** (2026). Інтерфейсні CFD-методи та їх порівняльний аналіз для мікрорівневого моделювання. *Технічний прогрес в АПК : XXI Міжнар. наук.-практ. конф.* (21–22 трав. 2026 р.). Харків : ДБТУ.

9. **Сировицький К. Г.** (2024). Результати досліджень технічного стану гідравлічних розпилювачів для захисту рослин. *Інноваційні технології в індустрії 5.0 : 30-ї міжнар. наук.-практ. конф.* (21–23 жовт. 2024 р.). Суми : СНАУ.

10. Мельник В. І., Шуляк М. Л., **Сировицький К. Г.** (2022). Методи та методика проведення діагностичних досліджень стану щілинних гідравлічних розпилювачів для хімічного захисту рослин. *Крамаровські читання* : зб. тез доп. IX Міжнар. наук.-техн. конф. з нагоди 115-ї річниці від дня народження д-ра техн. наук, проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ В. С. Крамарова (24–25 лют. 2022 р., м. Київ). (*Здобувачу належить аналіз літературних джерел та постановка методики проведення досліджень*).

11. **Сировицький К. Г.** (2020). Дослідження впливу робочого тиску та обслуговування розпилювачів гідравлічного обприскувача на технічний стан розпилювачів. *Сучасні проблеми землеробської механіки* : Конф., присвяч. 90-річчю ХНТУСГ ім. П. Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка П. М. Василенка (17–18 жовт. 2020 р.).

12. **Сировицький К. Г.** (2017). Стенд для випробування розпилювачів. *Інноваційні розробки в аграрній сфері* : Міжнар. наук.-практ. конф. Харків : ХНТУСГ, (30 листоп. 2017 р.). С. 34.

13. **Сировицький К. Г.**, Мельник В. І. (2013). Технології випробувань розпилювачів машин для хімічного захисту рослин. *Проблеми конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарської техніки* : IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Кіровоград : КНТУ. (*Здобувачу належить аналіз технологій випробувань розпилювачів та патентний пошук*).

14. **Сировицький К. Г.** (2011). Розробка спеціалізованих розпилювачів, призначених для внутрішньогрунтового стрічкового внесення рідких засобів хімізації в рослинництві. *Молодь і технічний прогрес в АПК* : Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених. Харків : ХНТУСГ. (*Здобувачу належить формування науково обґрунтованих засад для розробки розпилювачів рідких засобів хімізації*).

Патенти України:

15. Анікеев О. І., Коробко А. І., Мельник В. І., Панкова О. В., **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л. (2023) Патент на корисну модель № 153267 Україна, МПК А01В 39/26. Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин. заявник і патентовласник Державна наукова установа "Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого". — № u202201854 ; заявл. 31.05.2022 ; опубл. 14.06.2023, Бюл. № 24/2023. (*Здобувачу належить результати патентного пошуку та формула стенду*)

АНОТАЦІЯ

Сировицький К.Г. Обґрунтування методів діагностування технічних параметрів гідравлічних розпилювачів для хімічного захисту рослин. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (технічні науки) — Центральноукраїнський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Кропивницький, 2026.

Дисертаційна робота висвітлює питання підвищення ефективності хімічного захисту рослин та дослідження технічних параметрів гідравлічних розпилювачів, що використовуються для внесення робочих розчинів пестицидів.

Основні дослідження були присвячені аналізу факторів деградації щілинних гідравлічних розпилювачів, математичному моделюванню їх гідродинаміки та розробці інноваційних методів оперативного діагностування. На основі проведеного аналізу конструктивних особливостей обприскувачів

встановлено, що всі машини, які використовуються для хімічного захисту рослин, мають спільну ознаку – робочий елемент для внесення робочої рідини, яким є розпилювач. Таким чином, дослідження та удосконалення розпилювачів має універсальний вплив на забезпечення якості роботи всіх типів обприскувачів, а отримані результати можуть бути використані для модернізації широкого парку сучасної техніки.

Багато вітчизняних та закордонних науковців займалися вивченням питань внесення рідких засобів захисту рослин, оптимізації параметрів штангових систем та покращення дисперсного складу крапель. Тенденції останніх наукових статей присвячені питанням економії дорогих хімічних препаратів, переходу до технологій точного землеробства та суттєвого зменшення екологічного навантаження на довкілля. Проте в реальних виробничих умовах інтенсивного аграрного виробництва технічні параметри розпилювачів безперервно змінюються під впливом абразивного зношування суспензіями, коливань тиску в магістралях та хімічної деградації. За умов роботи в таких складних експлуатаційних умовах з'являється ще багато недосліджених науковцями питань. І одним із таких критичних питань є виявлення початкових стадій деградації вихідного сопла щілинного гідравлічного розпилювача та формування структури його факела під впливом геометричних змін соплового отвору.

Доведено, що поточний технічний стан розпилювачів є визначальним чинником якості виконання всього технологічного процесу захисту рослин. Будь-яке зношення або дефекти змінюють витрату рідини, кут факела і спектр крапель, що безпосередньо знижує показник рівномірності і підвищує ризик неконтрольованого дрейфу крапель вітром. Траєкторія та характер розпаду струменя при деформації сопла суттєво відрізняються від роботи нового елемента. Питання гідродинаміки двофазного потоку на виході із пошкодженого отвору є набагато складнішим і потребує врахування багатьох чинників. Звичайні операційні регулювання обприскувача, такі як зміна тиску, висоти штанги чи швидкості руху агрегату, неспроможні усунути геометричні зміни у соплі розпилювача і не повертають факел до початкового класу крапель – отже, вони не можуть компенсувати втрату якості. У той же час існуючі методи встановлення ступеня зношення розпилювачів є неефективними для швидкої реалізації безпосередньо в аграрних підприємствах. Відсутність доступного експрес-методу дослідження якості функціонування розпилювачів має негативний вплив на екологію і знижує економічну ефективність вирощування сільськогосподарських культур.

Сучасні системи хімічного захисту рослин активно використовують технології імпульсно-кодової модуляції (PWM) та автоматизованого контролю виливу. Встановлено, що до найпоширенішого і технологічно перспективного типу належать щілинні гідравлічні розпилювачі, які є повністю сумісними з PWM-системами та стандартними штанговими тримачами. Їхня популярність обумовлена поєднанням офіційно підтвердженого зниження знесення крапель, високої біологічної ефективності та економічності в експлуатації. Саме тому дослідженню підлягає взаємозв'язок між просторовою формою соплового отвору щілинного розпилювача та характером розподілу робочої рідини. Існуючі методи дослідження розпилювачів зазвичай фіксують лише загальну норму виливу та форму факела у вільному просторі. Водночас у науковій практиці повністю відсутня методика і дослідний стенд для аналізу якості розпилю безпосередньо на цільову листову поверхню рослини. Виявлений методологічний вакуум зумовлює необхідність розробки інноваційного

обладнання, яке здатне визначати секундний вилив розпилювачів та формувати точну геометричну фігуру факела безпосередньо на поверхні листа рослини.

В дисертації виконано глибоке математичне моделювання процесів гідродинаміки факела розпилу щільного розпилювача. Створена аналітична модель дозволяє встановити чіткий взаємозв'язок між формою соплового отвору та характером розподілу робочої рідини по поверхні обробітку з урахуванням діаметра крапель, їх початкової швидкості, коефіцієнта витрати та кореневого кута факела. Імітаційне моделювання роботи розпилювача при прогресуючій зміні геометрії його сопла проведено з використанням методу скінченних об'ємів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Для цього була побудована точна тривимірна геометрія з урахуванням внутрішніх розмірів каналів розпилювача, обґрунтована модель, розподіл діаметрів крапель та визначені характеристики розрахункового домену обчислювальної області.

За результатами імітаційного моделювання визначений взаємозв'язок між характером розподілу рідини по поверхні обробітку, який приведено до двовимірної координатної осі. Це дозволило розрахувати коефіцієнт варіації (CV), який характеризує працездатність розпилювача, з обов'язковим урахуванням зони перекриття між сусідніми факелами на штанзі. На основі цифрових обчислень була теоретично обґрунтована область працездатного стану розпилювача, межі якої задаються граничним агротехнічним коефіцієнтом варіації $CV = 15\%$ та граничним розміром соплового отвору. При цьому математично доведено ефект гіперчутливості системи.

Для верифікації теоретичних моделей у роботі було розроблено оригінальну конструкцію, обґрунтовано матеріали та створено лабораторний стенд для високоточного випробування щільних гідравлічних розпилювачів. Дане обладнання дозволяє імітувати роботу розпилювачів у реальних польових умовах із можливістю варіювання експлуатаційних параметрів, таких як відстань до поверхні обробітку, тиск та температура рідини. Основною перевагою запропонованого обладнання та методики є можливість диференційовано визначати мікроскопічні зміни у характері розподілу рідини, фіксуючи локальні осередки небезпечної концентрації препарату або, навпаки, зони його дефіциту.

З метою практичного впровадження результатів у виробництво було обґрунтовано методику прискореного (експрес) визначення характеру розподілу робочої рідини. Вона базується на оптимізації та зменшенні обсягу аналітичної інформації за рахунок локалізації ключових осередків концентрації маси потоку. Завдяки виявленій симетрії деградаційних процесів, математичний опис і аналіз розподілу рідини вдалося привести всього до одного або двох координаційних квадрантів, що суттєво скорочує час проведення експерименту без втрати точності.

Для апроксимації фінальних експериментальних результатів, на підставі порівняння регресійних моделей, була математично обґрунтована квадратична модель, оскільки вона продемонструвала найвищий коефіцієнт детермінації та мінімальні похибки. Перевірка адекватності створеної моделі підтвердила її повну статистичну значимість. Отримані експериментальні результати дозволили уточнити межі реального працездатного стану розпилювача. На підставі цих даних розроблено чіткі інженерні рекомендації для експлуатації розпилювачів. Розроблені практичні рекомендації та діагностичні технології були успішно перевірені під час натурних польових досліджень самохідного обприскувача. Розроблене обладнання і технології діагностування призначені для широкого використання в машинах для хімічного захисту рослин.

Ключові слова: гідравлічний розпилювач, діагностування технічного стану, щільне сопло, гідродинамічні характеристики факела розпилювання, випробувальний стенд, експрес-метод контролю, пляма розпилення, хімічний захист рослин.

ABSTRACT

Sirovitskiy K.H. Substantiation of methods for diagnosing the technical parameters of hydraulic nozzles for chemical plant protection. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

The dissertation is submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.05.11 – Machines and Means of Mechanization of Agricultural Production (Technical Sciences) – Central Ukrainian National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kropyvnytskyi, 2026.

The dissertation thesis addresses the issues of increasing the efficiency of chemical plant protection and investigating the technical parameters of hydraulic nozzles used for the application of pesticide working solutions. The core research focuses on analyzing the degradation factors of hydraulic flat-fan nozzles, mathematical modeling of their hydrodynamics, and developing innovative methods for rapid online diagnostics. Based on the analysis of sprayer design features, it has been established that all machines used for chemical plant protection share a common attribute—the active working element for fluid application, which is the nozzle. Consequently, the research and improvement of nozzles exert a universal influence on ensuring the operational quality of all sprayer types, and the obtained results can be utilized to modernize a wide fleet of modern machinery.

Numerous domestic and foreign scientists have studied the application of liquid plant protection products, the optimization of spray boom parameters, and the improvement of the droplet size spectrum. Trends in recent scientific papers focus on saving expensive chemical products, transitioning to precision agriculture technologies, and significantly reducing the environmental load on ecosystems. However, under real production conditions of intensive agricultural operations, the technical parameters of nozzles undergo continuous changes driven by abrasive wear from suspensions, pressure fluctuations in delivery manifolds, and chemical degradation. Under such complex operating conditions, many questions remain unexplored by researchers. One of these critical issues is the detection of the early stages of degradation in the discharge orifice of a hydraulic flat-fan nozzle and the formation of its spray pattern structure under the influence of geometric orifice alterations.

It is proven that the current technical state of nozzles is a decisive factor in the quality of the entire technological process of plant protection. Any wear or defects alter the flow rate, spray angle, and droplet spectrum, which directly reduces distribution uniformity and increases the risk of uncontrolled wind drift. The trajectory and atomization pattern of a liquid jet under orifice deformation differ significantly from the performance of a brand-new component. The hydrodynamics of two-phase flow at the outlet of a damaged orifice are much more complex and require factoring in multiple variables. Conventional operational adjustments of a sprayer, such as altering manifold pressure, adjusting boom height, or varying travel speed, are incapable of eliminating geometric changes within the nozzle orifice and cannot return the spray pattern to its initial droplet size category – thus, they fail to compensate for the loss of quality. At the same time, existing methods for

determining nozzle wear are inefficient for quick field implementation directly at agricultural enterprises. The lack of an available express method for evaluating nozzle performance negatively affects the environment and reduces the economic efficiency of crop cultivation.

Modern chemical plant protection systems actively utilize pulse-width modulation (PWM) technologies and automated flow rate control. It has been established that hydraulic flat-fan nozzles represent the most widespread and technologically promising type, being fully compatible with PWM systems and standard nozzle holders. Their popularity is driven by a combination of verified droplet drift reduction, high biological efficacy, and cost-effective operation. Therefore, the relationship between the spatial configuration of a flat-fan nozzle orifice and the character of the working fluid distribution is subject to investigation. Existing nozzle research methods typically record only the integral flow rate and the free-space spray angle. Meanwhile, in scientific practice, a methodology and a test bench for analyzing spray deposition quality directly onto the target leaf surface of plants are completely absent. This methodological vacuum necessitates the development of innovative equipment capable of determining the nozzle flow rate per second and generating the exact geometric topography of the spray footprint directly on the plant leaf surface.

The dissertation features in-depth mathematical modeling of the spray pattern hydrodynamics of a flat-fan nozzle. The developed analytical model establishes a clear relationship between the orifice geometry and the character of the working fluid distribution over the treated surface, comprehensively incorporating droplet diameter, initial velocity, discharge coefficient, and the spray boom root angle. Predictive simulation of nozzle performance under progressive orifice geometry alteration was executed using the Finite Volume Method of Computational Fluid Dynamics (CFD). For this purpose, a high-precision 3D geometry factoring in the internal dimensions of the nozzle channels was constructed, the mesh model was substantiated, the droplet size distribution was integrated, and the characteristics of the computational domain were defined.

Based on the predictive simulation results, the relationship between the character of fluid distribution over the treated surface, mapped to a two-dimensional coordinate plane, was determined. This enabled the calculation of the coefficient of variation (CV), which characterizes nozzle serviceability, while mandatory accounting for the overlap zone between adjacent sprays on the boom. On the basis of digital computations, the domain of the nozzle's operable state was theoretically substantiated, the boundaries of which are limited by the maximum agrotechnical coefficient of variation $CV = 15\%$ and the maximum allowable orifice dimension. Furthermore, the effect of hydrodynamic system hypersensitivity was mathematically proven.

To verify the theoretical models, an original design was engineered, appropriate structural materials were substantiated, and a laboratory test bench for high-precision verification of hydraulic flat-fan nozzles was manufactured. This equipment enables the replication of nozzle performance under real field conditions with the ability to dynamically vary operational parameters such as the vertical distance to the target surface, working pressure, and liquid temperature. The core advantage of the proposed

equipment and methodology lies in the capacity to differentially capture microscopic changes in fluid distribution patterns, exposing localized zones of hazardous chemical concentration or, conversely, areas of product deficit.

With the aim of practical production implementation, a methodology for accelerated (express) determination of the working fluid distribution pattern was substantiated. The method operates on the principle of minimizing and optimizing the volume of analytical data by localizing key fluid mass concentration zones. Due to the discovered symmetry of degradation processes, the mathematical description and distribution analysis were successfully reduced to just one or two coordinate quadrants, yielding a drastic reduction in experiment runtime without compromising overall accuracy.

To approximate the final experimental results based on a comparison of regression models, a quadratic model was mathematically substantiated, as it demonstrated the highest coefficient of determination and minimal standard errors. The adequacy verification of the developed model confirmed its full statistical significance. The acquired experimental results allowed for the refinement of the boundary limits governing the nozzle's actual operable state. Based on these metrics, clear engineering guidelines for nozzle field exploitation were established. The developed practical recommendations and diagnostic technologies were successfully validated via full-scale field testing on a self-propelled sprayer. The developed diagnostic equipment and technologies are designed for widespread utilization in machinery for chemical plant protection.

Keywords: hydraulic nozzle, technical state diagnostics, flat-fan orifice, hydrodynamic spray pattern characteristics, laboratory test bench, express control method, spray footprint, chemical plant protection.

Підписано до друку 04.09.2026 р.

Формат 60х90 1/16. Тираж 70 прим.

Друк цифровий. Папір офсетний.

Видавництво та друк — ФОП Вождаєв Ю. М.
40001, Україна, м. Суми, вул. Холодноярської бригади, 24/1

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК № 7366 від 21.05.2019 р.

Тел.: +38 (050) 407 56 57

papirus.sumy.ua@gmail.com

www.papirus.org.ua

