

25. Salo, V. M. et al. (2014). Development of a new pneumatic-sieve grain-cleaning machine design. Vol. 1. Substantiation of the conveyor-separator parameters. Kirovohrad : SPD FO Lysenko V. F. [in Ukrainian]

Mykhailo Kryshko

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Experimental Studies of the Operation of a String Sieve

This paper is devoted to the experimental determination of the optimal working length of the string screen in a grain cleaning machine. String screens are promising separation elements due to the self-cleaning nature of their working surface, low metal content and reduced susceptibility to clogging compared to perforated screens; however, their optimal dimensions depend significantly on operating conditions.

The aim of the study was to determine the influence of grain feed rate, screen inclination angle and grain moisture content on the working length of the string screen required to complete the separation process. The study was carried out using a full factorial experiment of the PFE 2³ type. The reproducibility of the results was confirmed using the Cochran criterion, the statistical significance of the coefficients using the Student's t-test, and the adequacy of the model using the Fisher criterion.

An adequate regression equation was obtained, describing the dependence of the required working length of the sieve on the variable factors. It was established that material feed rate has the greatest influence, whilst grain moisture content and the angle of inclination of the sieve have a lesser influence. It was found that an increase in all factors impairs the grain sieving process, increasing the required working length of the sieve. The results can be used to justify the design parameters of string screens in grain cleaning machines.

string screen, working length, grain separation, grain moisture content, full factorial experiment, regression equation, response surface

Одержано (Received) 18.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 25.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026

УДК 631.816.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.69-77>

О. М. Кобець, доц., канд. техн. наук, Є. І. Лепеть

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: sadjem1990@gmail.com

Результати порівняльних досліджень пристрою для внесення РМД

Якість поверхневого розподілу агрохімікатів є визначальним чинником ресурсозбереження та екологічної безпеки в рослинництві. Роботу присвячено вирішенню науково-технічної суперечності між необхідністю підтримання регламентованої дисперсності розпилу та деструктивним впливом вітрового навантаження на штангу обприскувача. Представлено результати порівняльних досліджень функціонування базових розпилювачів (РД-4,0, RD.05.SD5-b) та розробленого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив. На основі розробленого алгоритму бінаризації та сегментації відбитків часток у середовищі Fiji (ImageJ) оцінено фундаментальні параметри осадження: кількість активних плям, інтегральний відсоток покриття, середню площу відбитка та діаметр за Фере. Встановлено, що запропоновані технічні рішення демонструють високу експлуатаційну адаптивність. Визначено, що комбінований дефлекторний пристрій мінімізує падіння коефіцієнта покриття поверхні до 3% при переході у відкрите поле, а комбінований струменевий пристрій зменшує процеси коагуляції та деструктивного гідродару часток. Результати досліджень підтверджують працездатність розробленого пристрою під час стендових та виробничих випробувань.

рідкі мінеральні добрива, комбінований пристрій, розпилювач, водочутливий папір, ImageJ, щільність покриття, штанговий обприскувач, факел розпилу, коагуляція краплин

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку світового та вітчизняного агропромислового комплексу характеризуються інтенсифікацією рослинництва, де ключова роль відводиться збалансованому мінеральному живленню сільськогосподарських культур. Ефективне управління ресурсами та підвищення врожайності в умовах кліматичних змін вимагають впровадження високотехнологічних рішень, серед яких особливе місце посідає застосування рідких мінеральних добрив. Популярність рідких форм зумовлена їхньою високою агрохімічною ефективністю, швидкою міграцією у ґрунтовому середовищі, високою доступністю поживних елементів для кореневої системи та точністю дозування [1-2]. Як зазначається у звітах IFA, глобальний перехід до рідких засобів живлення є одним із провідних векторів сталого розвитку світового агровиробництва [3]. На відміну від традиційних гранульованих добрив, використання РМД мінімізує втрати у вигляді пилу та забезпечує кращу фізіологічну реакцію рослин [4, 5].

Основним технічним засобом для реалізації поверхневого та позакореневого внесення рідких добрив у виробничій практиці залишаються штангові обприскувачі [6]. Вони мають суттєві переваги перед іншими технологічними схемами, забезпечуючи ширший діапазон норм внесення, високу продуктивність та універсальність застосування у різні фази вегетації рослин. Проте ефективність технологічного процесу внесення РМД штанговими обприскувачами залежить від технічних параметрів робочих органів – розпилювачів, які відповідають за формування заданого дисперсного складу краплин та структури факела розпилу [7, 8].

Головна науково-технічна суперечність полягає в тому, що під час роботи обприскувача у реальних польових умовах на якість розподілу робочої рідини впливають випадкові збурюючі аеродинамічні фактори (швидкість і пульсація вітрового потоку, турбулентні завихрення за агрегатом тощо) та динамічні коливання штанги [9, 10]. Це призводить до знесення дрібнодисперсних краплин, деформаційного злиття часток, нерівномірності покриття цільової поверхні та, як наслідок, до перевитрати дороговартісних добрив і зниження загальної ефективності живлення. Поширені серійні дефлекторні чи багатоструминні розпилювачі не повною мірою забезпечують стабільність гідравлічних режимів та монолітності відбитків краплин за нестабільних умов відкритого агрофону [11].

З огляду на це, виникає гостра потреба в розробці та впровадженні комбінованого пристрою до обприскувачів, здатного адаптивно трансформувати потенціал гідродинамічного подрібнення потоку рідини, формувати стабілізовані газорідинні факели із заданими метричними характеристиками краплин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення якості та рівномірності розподілу робочої рідини по цільовій поверхні під час штангового обприскування приділяється значна увага як у вітчизняній, так і в закордонній науковій спільноті. Модернізація робочих органів обприскувачів та впровадження нових методик оцінки параметрів факела розпилу розвиваються у двох взаємопов'язаних напрямках: оптимізація гідродинамічних характеристик розпилювачів та вдосконалення цифрових інструментів фіксації плям-відбитків краплин.

Ефективним технологічним рішенням для зниження ризику дрейфу робочого розчину та стабілізації дисперсного складу є застосування інжекторних технологій. Так, у дослідженні [12] проведено комплексну оцінку потенціалу зниження знесення робочої рідини інжекторними розпилювачами за різних режимів робочого тиску. Авторами доведено, що насичення рідини повітрям дозволяє суттєво оптимізувати медіанно-масовий діаметр краплин, проте стабільність сформованого газорідинного

факела критично залежить від підтримання регламентованих гідравлічних параметрів, оскільки різкі коливання тиску можуть нівелювати протидію дрейфу рідини.

У вітчизняній науковій школі фундаментальні інженерні підходи до розв'язання цієї проблеми закладені у праці Мележика О. І. [13]. Автор присвятив дисертаційне дослідження покращенню дисперсності розпилення робочих розчинів шляхом наукового обґрунтування геометричних і кінематичних параметрів розпилювальних пристроїв. У роботі акцентовано увагу на фізико-механічних закономірностях дроблення струменя рідини та взаємодії потоку з робочими поверхнями розпилювача.

Точність експериментальних лабораторних та польових досліджень розпилювальних пристроїв залежить також і від надійності методів реєстрації відбитків краплин. Традиційним та найбільш доступним інструментом для цього залишається водочутливий папір. Ключовою проблемою при його використанні є деформаційне злиття та взаємне перекриття плям від краплин за високих норм внесення або підвищеного тиску. Новітній методологічний підхід до вирішення цієї проблеми запропоновано авторами [14], шляхом розробки алгоритму сегментації перекритих краплин. Методика дозволяє розділяти контури плям, що злилися, забезпечуючи значно точнішу характеристику реальної структури покриття та розподілу рідини на цільовій поверхні.

Авторами [15] було проведено порівняльний аналіз поширених спеціалізованих програмних пакетів для аналізу водочутливого паперу з відбитками плям. У роботі доведено, що вибір програмного середовища суттєво впливає на кінцеві розрахункові показники дисперсності. Встановлено, що за умови підвищеної щільності осадження краплин більшість безкоштовних утиліт схильні до недооцінки дрібної фракції через оптичне злиття об'єктів, що вимагає точного калібрування порогів бінаризації та верифікації за допомогою еталонних лабораторних засобів обробки зображень.

Проблема математичної декомпозиції та цифрового аналізу відбитків на водочутливому папері активно досліджується й іншими науковцями. Zhu Н. та його колеги [16] розробили та верифікували спеціалізоване програмне забезпечення «DepositScan», яке базується на інтегрованих алгоритмах ImageJ для швидкого сканування водочутливого паперу та оцінки щільності покриття.

Вагомий внесок у розуміння фізичних обмежень штучних мішеней зроблено у дослідженні, присвяченому оцінці осадження розпилу на основі обробки зображень водочутливого паперу [17]. Авторами науково обґрунтовано, що за умов інтенсивного дрібнодисперсного обприскування або застосування рідин із високою густиною виникає ефект «псевдонасичення» паперу, коли дрібні краплі потрапляють у зони вже існуючих плям і не фіксуються алгоритмами як окремі об'єкти. Це призводить до викривлення значень медіанно-масового діаметра краплин. Дослідники довели необхідність впровадження динамічних коефіцієнтів розпластування краплин залежно від в'язкості та поверхневого натягу робочого розчину для нівелювання похибок під час комп'ютерного сканування.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив у виробничих умовах, а також співставлення отриманих результатів з попередніми стендовими випробуваннями [18, 19].

Виклад основного матеріалу. Верифікація результатів лабораторних випробувань та оцінка ефективності функціонування розробленого комбінованого пристрою в умовах реального експлуатаційного середовища реалізовувалися шляхом проведення серії польових експериментів на відкритому агрофоні. Для цього експериментальні зразки робочих органів встановлювались на гідравлічну штангу

серійного польового обприскувача ОП-24. Дослідження проводилися за різних режимів роботи технічного засобу [18, 19].

Прямим інструментом фіксації та подальшої ідентифікації топологічних параметрів осадження факела розпили рідини слугували штучні мішені у вигляді карток стандартного водочутливого паперу виробництва Syngenta розміром 76x26 мм. Картки розташовувалися на горизонтальній поверхні поля за чітко визначеною просторовою координатною схемою. Фіксація паперових смужок здійснювалася за допомогою спеціалізованих тримачів (рис. 1), які встановлювалися в поперечній площині з кроком 250 мм, що дозволяло детально проаналізувати як центральну зону факела розпили поодинокого пристрою, так і ділянки взаємного перекриття суміжних потоків рідини.



а



б

Рисунок 1 – Тримач з водочутливим папером:
а – до проходу агрегату; б – після проходу.

Джерело: розроблено авторами

У поздовжній площині руху агрегату тримачі мішеней позиціонувалися з інтервалом 500 мм. Висота розташування штанги обприскувача над цільовою поверхнею штучних мішеней регламентувалася відповідно до значень прийнятих на етапі експериментальних досліджень. Після завершення кожного проходу обприскувача експериментальні картки водочутливого паперу вилучалися з тримачів, піддавалися обов'язковому маркуванню та пакувалися для унеможливлення випадкового контакту з атмосферною вологою перед проведенням аналізу.

Наступний етап передбачав переведення отриманих паперових відбитків у цифровий формат за допомогою сканування із щільністю оптичної сітки 1200 DPI (рис. 2, а). Такий рівень роздільної здатності є необхідним, оскільки він дозволяє уникнути деградації дрібнодисперсної фракції краплин. Отримані файли експортувалися в аналітичне середовище комп'ютерного зору Fijі (ImageJ), де піддавалися покроковому математичному та морфологічному аналізу.

Процедура цифрової обробки зображень починалася з обов'язкового просторового калібрування зразків, що дозволяло трансформувати матрицю пікселів у лінійні одиниці вимірювання. З метою оптимізації контрастності відбитків вихідне повноколірне растрове зображення конвертувалося у 8-бітний монохромний формат (рис. 2, б). Для виокремлення корисного сигналу взаємодії рідини із паперовим покриттям на тлі випадкових оптичних шумів реалізовувався алгоритм бінаризації, який диференціював кожен пункт за порогом яскравості та перетворював зразок на двокомпонентну чорно-білу матрицю об'єктів.

Враховуючи високу щільність осадження краплин та їх схильність до деформаційного злиття, важливим кроком методики стало застосування спеціалізованої морфологічної операції «Watershed» (рис. 2, в). Цей алгоритм виконував математичний аналіз геометрії злитих плям та здійснював автоматичне просторове розділення

суміжних або частково перекритих відбитків по лініях їхніх локальних мінімумів, що дозволило зменшити похибку помилкового об'єднання декількох самостійних краплин в один великогабаритний об'єкт під час автоматизованого розрахунку.

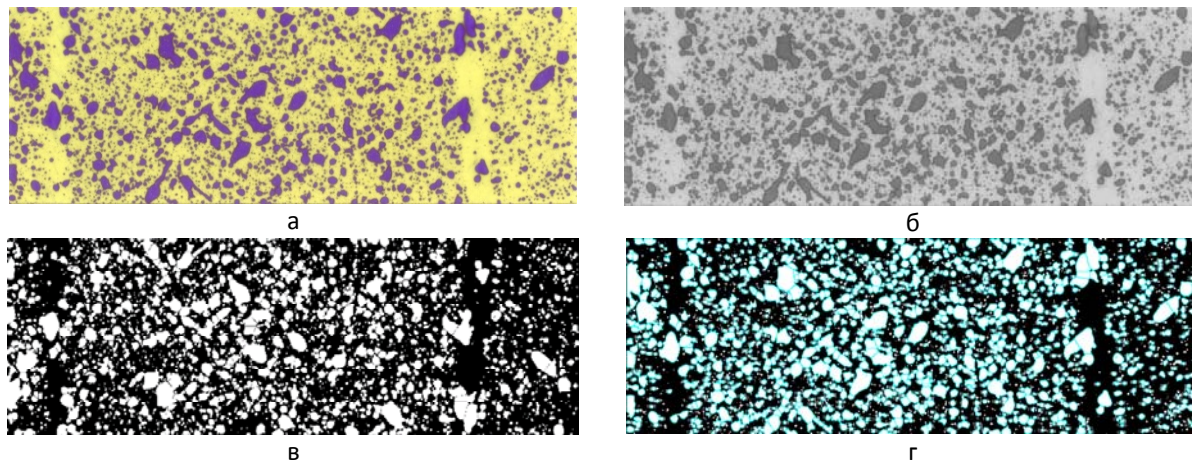


Рисунок 2 – Покрокова обробка WSP в середовищі ImageJ:

а – відсканований зразок WSP; б – 8-бітне зображення зразка;

в – зразок після бінаризації та Watershed; г – зображення зразка після проведення аналізу.

Джерело: розроблено авторами

Фінальний кількісний та статистичний аналізи сформованого масиву геометричних об'єктів (рис. 2, г) виконувалися за допомогою інтегрованого інструмента «Analyze Particles» (рис. 3). Під час його налаштування вводилися фільтри обмеження розмірів, що дало змогу автоматично виключити з аналізу поодинокі субпіксельні об'єкти, які інтерпретувалися як цифровий шум або мікродефекти сканування паперу. За результатами роботи програмного модуля обчислювалися такі фундаментальні показники, як загальний інтегральний відсоток покриття цільової поверхні рідиною (f , %), кількість активних відбитків краплин (C , шт) на одиницю площі паперу, середня лінійна площа поодинокі плями (F , мм^2) та діаметр за Фере (d_f , мкм). Отримані числові масиви автоматично систематизувалися та експортувалися у табличні формати для подальшого зіставлення з еталонними лабораторними даними та технічними показниками серійних промислових розпилювачів.

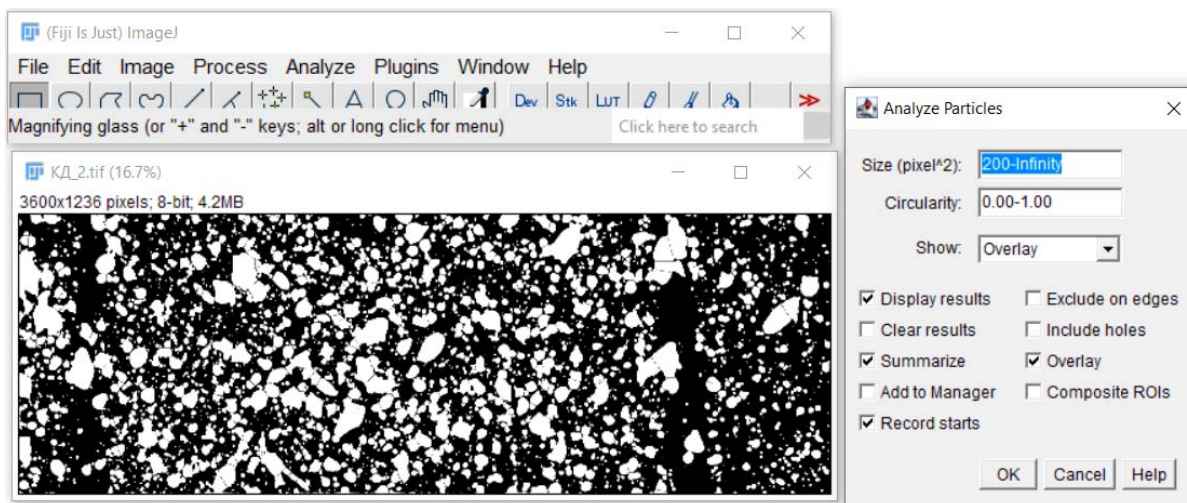


Рисунок 3 – Панель налаштувань інструмента Analyze Particles

Джерело: розроблено авторами

Для встановлення ступеня впливу навколишнього середовища на рівномірність осадження рідини на цільову поверхню, лабораторний етап досліджень було розширено серією випробувань на спеціалізованому стенді «Рухоме поле». Конструкція зазначеного стенда дозволяє змінювати швидкість переміщення цільової поверхні під розпилювачем в ізолюваному лабораторному просторі, повністю нівелюючи випадкові коливання штанги та неконтрольовані пульсації вітру. Це забезпечило отримання еталонних бінарних матриць осадження краплин для кожного з досліджуваних варіантів розпилювальних пристроїв за режимами визначеними в попередніх експериментах [18, 19].

Зведені результати комп'ютерного аналізу штучних мішеней, що ілюструють зміну дисперсних показників розпилювачів при переході від еталонних стендових умов до експлуатаційних режимів, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати аналізу водочутливого паперу в середовищі ImageJ

Показник	РД-4,0		КД*		RD.05.SD5-b		КС*	
	С*	П*	С*	П*	С*	П*	С*	П*
С, шт	2047	1818	2442	2236	1160	850	1356	1486
на 1 см ²	95-105	84-92	118-126	110-118	55-62	38-45	68-75	72-77
f, %	29,3	25,6	33,8	30,8	25,9	24,2	28,1	28,9
F, мм ²	0,28	0,20	0,31	0,29	0,43	0,59	0,48	0,50
d _ф , мкм	645	563	610	586	750	613	691	650

*КД – комбінований дефлекторний; КС – комбінований струменевий; С – стендові; П – польові

Джерело: розроблено авторами

Аналіз експериментальних масивів даних в табл. 1, дозволяє встановити фундаментальні фізико-гідравлічні закономірності розбудови газорідинних потоків та оцінити їх стійкість при переході від контрольованих лабораторних умов до деструктивного впливу відкритого агрофону.

Аналізуючи поведінку базового серійного дефлекторного розпилювача РД-4,0, виявлено суттєву деградацію його робочих параметрів. Перехід від стендових до польових умов супроводжується різким падінням загальної кількості зареєстрованих відбитків з 2047 до 1818 шт., що корелює зі зниженням щільності осадження на 1 см² (з 95–105 до 84–92 шт./см²). Найбільш критичним експлуатаційним показником є зниження інтегрального коефіцієнта покриття поверхні f на 12 %. Таке явище інструментально доводить неспроможність стандартного дефлекторного розпилювача протидіяти польовому вітровому навантаженню. Тонка рідка плівка, що сходить з екрана РД-4,0, під дією зустрічного аеродинамічного збурення зазнає хаотичного зриву, генеруючи велику частку легких дрібнодисперсних краплин, які дрейфують за межі штучної мішені.

Протилежний характер деформації робочого факела зафіксовано у струменевому розпилювачі RD.05.SD5-b. У польових умовах кількість відбитків на см² знижується до критичного мінімуму 38–45, проте середня площа F плями суттєво зростає – з 0,43 до 0,59 мм². Це свідчить про інтенсифікацію процесів коагуляції часток. Суцільні вертикальні струмени рідини не встигають розпастися на стабільні відокремлені краплі і здійснюють динамічний удар об мішень, утворюючи зони локального перевищення норми внесення.

Впровадження розроблених комбінованих технічних рішень продемонструвало високу стабілізуючу здатність і адаптивність технологічного процесу. Комбінований дефлекторний пристрій як на стенді, так і в полі забезпечує найвищі показники щільності потоку краплин 2442 та 2236 шт. відповідно, утримуючи стабільну щільність

осадження 110–126 шт./см². Падіння коефіцієнта покриття поверхні f становить лише 3%, що є мінімальним показником серед усіх досліджуваних зразків.

Комбінований струменевий пристрій, продемонстрував покращення дисперсного складу у виробничих умовах. Загальна кількість зареєстрованих часток S у польових умовах навіть зросла з 1356 до 1486 шт., а коефіцієнт покриття f збільшився з 28,1 до 28,9%. Середня площа відбитка F та діаметр за Фере d_f зазнали мінімальних флуктуацій. Фізичне обґрунтування отриманого адаптивного ефекту розроблених конструкцій КД та КС полягає у принципі попереднього гідродинамічного дроселювання та раціонального вибору кута взаємодії потоку з робочими поверхнями. Завдяки оптимізації внутрішньої геометрії, згенерований факел розпилу набуває підвищеної інерційності часток, де ядро концентрується в оптимальному діапазоні лінійних розмірів. Такі краплі володіють достатньою кінетичною енергією, щоб протидіяти знесенню вітром, але при цьому не здійснюють деструктивного гідроудару об цільову поверхню мішені, запобігаючи псевдонасиченню та стіканню робочого розчину рідини.

Висновки. Проведені стендові та виробничі дослідження дозволили здійснити порівняльну оцінку функціонування серійних розпилювачів і розробленого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив. Залучення розробленої цифрової методики покрокової сегментації штучних мішеней у середовищі комп'ютерного зору ImageJ з інтеграцією морфологічного алгоритму «Watershed» забезпечило високоточну декомпозицію частково перекритих або злитих відбитків краплин, мінімізувавши похибки квантування та розрахунку топологічних параметрів осадження факела розпилу.

Експериментально доведено високу стабілізуючу здатність та експлуатаційну адаптивність розробленого комбінованого технічного рішення до деструктивного впливу випадкових факторів відкритого агрофону. Комбінований дефлекторний пристрій продемонстрував найвищу стійкість технологічного процесу, зберігши за умов переходу від стендових до польових випробувань щільність осадження краплин на рівні 110–118 шт./см² при мінімальних флуктуаціях інтегрального коефіцієнта покриття поверхні. Водночас комбінований струменевий пристрій забезпечив оптимізацію дисперсного складу часток у виробничому середовищі, усунувши характерний для промислового аналога RD.05.SD5-b ефект псевдонасичення мішені за рахунок зменшення процесу деформаційного злиття часток і деструктивного гідроудару.

Список літератури

1. Машини і обладнання для приготування та внесення добрив: посібник / [Колектив авторів]; за ред. В.І. Кравчука; М-во аграр. політики та прод-ва України; УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2011. 152 с.
2. Економічна ефективність використання карбамід-аміачних сумішей (КАС) в сучасних системах удобрення сільськогосподарських культур / Крамарьов С. М., Крамарьов О. С., Демиденко В. Г. та ін. Дніпро: Нова ідеологія, 2020. 195 с.
3. International Fertilizer Association. *Short-Term Fertilizer Outlook 2024–2025*. https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2025/02/2024_ifa_short_term_outlook_report.pdf. (дата звернення: 10.06.2026).
4. Крамарьов С. М., Бандура Л. П., Крамарьов О. С. Рідкі комплексні добрива. Переваги використання порівняно із твердими туками. *Агроном*. 2021. № 1. С. 22–26. Режим доступу: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/3753>. (дата звернення: 11.06.2026).
5. Li X., Zhang X., Wang S., Hou W., Yan L. The Combined Use of Liquid Fertilizer and Urease/Nitrification Inhibitors on Maize Yield, Nitrogen Loss and Utilization in the Mollisol Region. *Plants*. 2023. Vol. 12, № 7. Article 1486. DOI: 10.3390/plants12071486.

6. Сухина А. Методи та способи застосування КАС на практиці. *Пропозиція. Спецвипуск. Сучасна техніка для захисту с.-г. культур*, 2017. С. 22–25.
7. Fernández V., Sotiropoulos T., Brown P. H. *Foliar Fertilization: Scientific Principles and Field Practices*. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2013. 140 p. ISBN 979-10-92366-00-6.
8. Коткова Т. М., Довбиш Л. Л. Вплив позакореневого (фоліарного) підживлення рослин пшениці озимої на урожай і якість зерна. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 2023. № 3. Р. 176–185. DOI: 10.32782/naturaljournal.3.2023.176–185.
9. Бабій А. В., Дзюра В. О., Головецький І. В. Дослідження впливу вертикальних коливань штанги обприскувача на рівномірність обприскування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 5(36). С. 216–226. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.216-226](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.216-226).
10. Slocombe J. W., Sharda A. *Agricultural Spray Nozzles: Selection and Sizing*. Manhattan (KS): Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. 12 с. <https://scispace.com/pdf/nozzles-selection-and-sizing-2ol2bturwk.pdf> (дата звернення: 14.06.2026).
11. Nuytens D., De Schampheleire M., Verboven P., Brusselman E., Dekeyser D. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays. *Transactions of the ASABE*. 2009. Vol. 52, № 5. Р. 1471–1480. DOI: 10.13031/2013.29127.
12. Wang S., Lan Y., Wen S., Zhang H., Hewitt A. J. Evaluation of spray drift reduction potential of air-induction nozzles under different operating pressures. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1018626. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1018626>.
13. Мележик О. І. Покращення дисперсності розпилення пестицидів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Дніпропетровський державний аграрний університет. Дніпро, 2009. 180 с.
14. Gil E., Xun L. A novel methodology for water-sensitive papers analysis focusing on the segmentation of overlapping droplets to better characterize deposition pattern. *Crop Protection*. 2024. Vol. 176. Article 106492. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106492>.
15. Mario Cunha, Claudia Carvalho, Andre R.S. Marcal. Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets. *Biosystems Engineering*. 2012. 111. p. 11–23 <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2011.10.002>.
16. Zhu H., Salyani M., Fox R. D. A portable scanning system for evaluation of spray deposit. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 76(2). P. 38–43. [10.1016/j.compag.2011.01.003](https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003)
17. Seweryn Lipiński. Image-Based Evaluation of Spray Deposition Using Water-Sensitive Papers: Metrics, Limitations, and Practical Implications. *AgriEngineering* Vol. 8. DOI: [10.3390/agriengineering8060220](https://doi.org/10.3390/agriengineering8060220).
18. Kobets O, Lepet Ye. Results of experimental studies of jet nozzles for the application of liquid mineral fertilizers. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 2025. 4(131), p. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-4>
19. Кобець О. М., Лепеть Є. І. Лабораторні дослідження зміни коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини дефлекторним розбризкувачем при внесенні агрохімікатів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. 13(44). С. 212–218. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).212-218](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).212-218)

References

1. Collective of authors (2011). *Machines and equipment for preparation and application of fertilizers: a manual*. V. I. Kravchuk (Ed.); Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine; L. Pohorilyi UkrNDIPVT. Doslidnytske: L. Pohorilyi UkrNDIPVT [in Ukrainian].
2. Kramarov, S. M., Kramarov, O. S., Demydenko, V. H., Khoroshun, K. O., Pisotskyi, S. S., Bondar, V. Yu., Ruban, S. M et al. (2020). *Economic efficiency of using urea-ammonium mixtures (UAN) in modern fertilization systems for agricultural crops*. Dnipro: Nova Ideolohiia [in Ukrainian].
3. International Fertilizer Association. *Short-Term Fertilizer Outlook 2024–2025*. URL: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2025/02/2024_ifa_short_term_outlook_report.pdf. [in English]
4. Kramarov, S. M., Bandura, L. P., & Kramarov, O. S. (2021). Liquid complex fertilizers. Advantages of use in comparison with solid fertilizers. *Agronomist*, 1, pp. 22–26. URL: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/3753> [in Ukrainian].
5. Li, X., Zhang, X., Wang, S., Hou, W., & Yan, L. (2023). The Combined Use of Liquid Fertilizer and Urease/Nitrification Inhibitors on Maize Yield, Nitrogen Loss and Utilization in the Mollisol Region. *Plants*. Vol. 12, № 7. Article 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12071486>. [in English]
6. Sukhyna, A. (2017). Methods and ways of UAN application in practice. *Propozytsiia. Special Issue. Modern Equipment for Protection of Agricultural Crops*, 22–25 [in Ukrainian].
7. Fernández V., Sotiropoulos T., Brown P. H. (2013). *Foliar Fertilization: Scientific Principles and Field Practices*. Paris: International Fertilizer Industry Association. ISBN 979-10-92366-00-6. [in English]

8. Kotkova, T. M., & Dovbysh, L. L. (2023). The effect of foliar feeding of winter wheat plants on the yield and quality of grain. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 3, 176–185. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.3.2023.176-185> [in Ukrainian].
9. Babii, A. V., Dziura, V. O., & Holovetskyi, I. V. (2023). Investigation of the effect of sprayer boom vertical vibrations on spraying uniformity. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 5(36), 216–226. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.216-226](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.216-226) [in Ukrainian].
10. Slocombe, J. W., & Sharda, A. (2009). Agricultural Spray Nozzles: Selection and Sizing. Manhattan (KS): Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. 12 c. <https://scispace.com/pdf/nozzles-selection-and-sizing-2012bturwk.pdf> [in English].
11. Nuytens, D., De Schampheleire, M., Verboven, P., Brusselman, E., & Dekeyser, D. (2009). Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays. *Transactions of the ASABE*. Vol. 52, № 5. P. 1471–1480. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.29127> [in English].
12. Wang, S., Lan, Y., Wen, S., Zhang, H., & Hewitt, A. J. (2023). Evaluation of spray drift reduction potential of air-induction nozzles under different operating pressures. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 14. Article 1018626. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1018626> [in English].
13. Melezhyk, O. I. (2009). *Improving the dispersion of pesticide spraying* (Candidate's thesis, Dnipro State Agrarian University). Dnipro [in Ukrainian].
14. Gil, E., & Xun, L. (2024). A novel methodology for water-sensitive papers analysis focusing on the segmentation of overlapping droplets to better characterize deposition pattern. *Crop Protection*. Vol. 176. Article 106492. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106492> [in English].
15. Mario Cunha, Claudia Carvalho, Andre R.S. Marcal. (2012). Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets. *Biosystems Engineering*. 111. p. 11–23 <https://doi.org/10.1016/j.BIOSYSTEMSENG.2011.10.002> [in English].
16. Zhu H., Salyani M., & Fox R. D. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 38–43. [10.1016/j.compag.2011.01.003](https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003) [in English].
17. Seweryn Lipiński. (2026). Image-Based Evaluation of Spray Deposition Using Water-Sensitive Papers: Metrics, Limitations, and Practical Implications. *AgriEngineering*. Vol. 8. DOI: [10.3390/agriengineering8060220](https://doi.org/10.3390/agriengineering8060220) [in English].
18. Kobets O, Lepet Ye. (2025). Results of experimental studies of jet nozzles for the application of liquid mineral fertilizers. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 4(131), p. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-4> [in English].
19. Kobets, O. M., Lepet, Ye. I. (2026). Laboratory studies of changes in the coefficient of variation of liquid transverse distribution by a deflector sprayer during agrochemicals application. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 13(44), 212–218. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).212-218](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).212-218) [in Ukrainian].

Oleksandr Kobets, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Yevhen Lepet

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Results of Comparative Studies of a Device for Liquid Mineral Fertilizer Application

The quality of surface distribution of agrochemicals is a determining factor for resource conservation and environmental safety in crop production. This work is dedicated to resolving the scientific and technical contradiction between the necessity of maintaining the regulated spray dispersity and the destructive impact of wind load on the sprayer boom. The results of comparative studies on the performance of base nozzles (RD-4.0, RD.05.SD5-b) and the developed combined device for liquid mineral fertilizer application are presented. Based on the developed algorithm for binarization and segmentation of particle impacts in the Fiji (ImageJ) environment, fundamental deposition parameters were evaluated: the number of active spots, integral coverage percentage, mean impact area, and Feret diameter. It was established that the developed technical solutions demonstrate high operational adaptability. It was determined that the combined deflector device minimizes the drop in surface coverage coefficient to 3% during the transition to the open field, while the combined jet device suppresses the processes of particle coagulation and destructive hydraulic shock. The research results confirm the operability of the developed device during bench and production trials.

liquid mineral fertilizers, combined device, spray nozzle, water-sensitive paper, ImageJ, coverage density, boom sprayer, spray pattern, droplet coagulation

Одержано (Received) 22.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 25.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026