МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛЕПЕТЬ ЄВГЕН ІВАНОВИЧ

УДК 631.348:631.816.3 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВНЕСЕННЯ РІДКИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

Галузь знань 13 – Механічна інженерія
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ Євген ЛЕПЕТЬ

Науковий керівник: Кобець Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Лепеть Є. І. Обґрунтування параметрів та режимів роботи пристрою для внесення рідких мінеральних добрив. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія») – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Міністерство освіти та науки України, Дніпро, 2026.

Метою роботи є підвищення ефективності та якості внесення рідких мінеральних добрив шляхом розроблення й наукового обґрунтування конструктивно-режимних параметрів комбінованого розпилювача з дефлекторним і струменевим режимами роботи на основі чисельного та експериментального дослідження процесу формування факела розпилу.

Об'єкт дослідження – технологічний процес внесення та розподілу рідких мінеральних добрив комбінованим розпилювальним пристроєм до штангового обприскувача.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії та трансформації гідродинамічного потоку робочої рідини в елементах комбінованого пристрою, а також залежність показників якості внесення від конструктивно-технологічних і режимних параметрів пристрою.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження базувалися на основних положеннях гідродинаміки, теорії струменів і дефлекторних поверхонь, механіки суцільного середовища, з використанням методів системного аналізу, диференціального та чисельного моделювання з залученням програмного середовища Simcenter Star-CCM+. Експериментальні дослідження виконувалися в лабораторних та виробничих умовах із застосуванням як стандартних методик згідно з діючими ДСТУ, так і спеціально розроблених програмно-методичних комплексів із залученням цифрового аналізу та бінарного матричного аналізу відбитків плям в програмному середовищі ImageJ. Обробка експериментальних даних, перевірка статистичних

гіпотез за критеріями Кохрена, Фішера і Стьюдента, а також побудова регресійних моделей здійснювалися методами математичної статистики з використанням прикладного програмного забезпечення Wolfram Cloud та Microsoft Excel.

Уперше встановлено комплекс математичних залежностей у вигляді квадратичних регресійних рівнянь, які відображають характер спільного впливу ключових чинників комбінованого розпилювача: величини робочого тиску, діаметра змінних дроселів, висоти розташування штанги та конструктивних параметрів над цільовою поверхнею на цільові критерії якості: рівень дисперсності й густоту осадження краплин на поверхні, а також загальний коефіцієнт варіації розподілу рідини, що дозволяє оптимізувати процес внесення добрив у межах регламентованих агровимог;

Уперше встановлено гідродинамічні закономірності трансформації та стабілізації газорідинного факела розпилу в процесі попереднього дроселювання потоку та його набігання на криволінійну дефлекторну поверхню комбінованого пристрою, що дозволило теоретично обґрунтувати параметри формування краплин раціональної маси та оптимального дисперсного складу (300-700 мкм) задля мінімізації дрейфу рідини.

Отримав подальший розвиток програмно-методичний апарат оцінювання дисперсного складу та монолітності відбитків краплин рідких мінеральних добрив на основі бінарного матричного аналізу цифрових зображень факела розпилу, що дозволило з високою точністю ідентифікувати адаптивний ефект трансформації потоку за умов динамічного опору відкритого агрофону.

Розроблений комбінований розпилювальний пристрій для штангових обприскувачів пройшов успішну виробничу апробацію та впроваджений у технологічний процес внесення рідких мінеральних добрив в умовах агропідприємств (ФОП «Боханченко І. С.», ФГ «ЛАРІНИ). Результати порівняльних випробувань підтвердили, що застосування запропонованого пристрою підвищує рівномірність розподілу робочої рідини по ширині захвату агрегату: у струменевому режимі коефіцієнт варіації поперечного розподілу (ψ) виявився на 2,1% нижчим за показник промислового аналога RD.05.SD5-b, а в дефлекторному режимі – на 1,13% нижчим за

базовий розпилювач РД-4,0. Матеріали досліджень та повний пакет конструкторсько-технологічної документації на дослідний зразок прийняті до науково-виробничого впровадження у конструкторсько-технологічному відділі ТОВ «АгроМОДУЛЬ» (м. Дніпро) для модернізації лінійки вузлів розподілу рідини та підготовки потужностей до дрібносерійного виробництва нових адаптивних систем. Крім того, розроблені методики лабораторно-стендового оцінювання гідродинамічних характеристик факела розпилу та алгоритми обробки цифрових зображень інтегровано в навчальний процес ДДАЕУ під час підготовки здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти за спеціальностями H7 «Агроінженерія» та G11 «Машинобудування».

Проведений аналіз підтвердив перспективність удосконалення технологій внесення рідких мінеральних добрив в Україні. Встановлено, що підвищення ефективності їх використання значною мірою залежить від якості формування факела розпилення, рівномірності розподілу робочої рідини та конструктивно-режимних параметрів розпилювальних пристроїв. Обґрунтовано доцільність удосконалення конструкції комбінованого розпилювача для забезпечення високої рівномірності та продуктивності внесення добрив у сучасних технологіях точного землеробства. В результаті патентно-інформаційного аналізу встановлено, що ефективність внесення рідких мінеральних добрив визначається конструктивними та режимними параметрами розпилювача, які впливають на дисперсність краплин, рівномірність розподілу та втрати внаслідок дрейфу. Обґрунтовано необхідність створення універсального розпилювача, здатного адаптуватися до різних умов і способів внесення. Запропоновано конструктивно-технологічну схему комбінованого розпилювача з двома режимами роботи – дефлекторним та струменевим, що забезпечує кероване формування факела, регулювання дисперсності та підвищення рівномірності внесення робочої рідини. Розроблена конструкція є сумісною з існуючими штанговими обприскувачами та створює основу для подальшої оптимізації її конструктивно-режимних параметрів.

У результаті теоретичних досліджень обґрунтовано підхід до чисельного моделювання процесу формування факела комбінованого розпилювача із

застосуванням удосконаленої Ейлерово–Лагранжевої моделі ELSA у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Запропонований динамічний перехід від ейлерової до лагранжевої фази за критеріями сферичності та характерного діаметра краплин забезпечує адекватний опис первинного руйнування суцільного струменя та подальшого руху дисперсної фази. Сформований фізико-математичний апарат і прийняті критерії переходу створюють основу для чисельного дослідження впливу конструктивних і режимних параметрів розпилювача на коефіцієнт варіації інтенсивності та кут розкриття факела, а також для визначення їх раціональних значень. Отримана модель була використана як інструмент обґрунтування конструкції та режимів роботи комбінованого розпилювача для забезпечення необхідної якості розподілу робочої рідини.

За результатами чисельного моделювання отримано математичні залежності другого порядку для оцінювання коефіцієнта варіації інтенсивності факела ψ та кута його розкриття β залежно від конструктивних і режимних параметрів комбінованого розпилювача. Встановлено нелінійний характер впливу та статистично значущі взаємодії факторів. Для струменевого режиму досліджено вплив кута між струменевими отворами φ, діаметра струменевих отворів δ, кількості отворів N, робочого тиску p, висоти штанги h та діаметра дроселя d. Для дефлекторного режиму встановлено вплив відстані від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, радіуса кривизни дефлекторної поверхні r, товщини крайки дефлектора t, робочого тиску p, висоти штанги h та діаметра дроселя d. Отримані залежності використано для багатокритеріальної оптимізації за критерієм мінімізації ψ/β, у результаті якої визначено раціональні параметри: для струменевого режиму – $\varphi = 26{,}6°$, $\delta = 2{,}2$ мм, $N = 5$; для дефлекторного – $l = 3{,}3$ мм, $r = 5{,}8$ мм, $t = 0{,}5$ мм.

За результатами лабораторних експериментальних досліджень підтверджено працездатність розробленого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив та встановлено закономірності формування його гідродинамічних характеристик. Візуальними дослідженнями встановлено, що за робочого тиску 0,20–0,30 МПа пристрій забезпечує стабільне та симетричне формування факела розпилу з плавним перекриттям суміжних факелів, тоді як за

тиску 0,15 МПа спостерігається нестабільне диспергування та витікання рідини у вигляді суцільних струменів. Перевіркою герметичності підтверджено відсутність підтікань у місцях спряження конструктивних елементів у досліджуваному діапазоні тиску. Встановлено, що хвилинна витрата робочої рідини закономірно зростає зі збільшенням робочого тиску та діаметра дросельного отвору. Відхилення витратних характеристик комбінованого пристрою порівняно із серійними розпилювачами РД-4,0 та RD.05.SD5-b становило відповідно 2,3–3,2 та 1,7–3,1 %, що не перевищує допустимого значення ±5 % та підтверджує стабільність його гідравлічних характеристик.

За результатами багатофакторних експериментальних досліджень отримано математичні моделі другого порядку, що описують залежність коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини ψ від робочого тиску p, висоти розташування штанги h та діаметра змінного дроселя d для серійних і розроблених комбінованих розпилювачів. Перевірка моделей за критеріями Кохрена, Стьюдента та Фішера підтвердила однорідність дисперсій, статистичну значущість коефіцієнтів та адекватність отриманих рівнянь, що свідчить про достовірність встановлених закономірностей. Аналіз поверхонь відгуку показав суттєвий взаємопов’язаний та нелінійний вплив досліджуваних факторів на рівномірність поперечного розподілу рідини. Визначено раціональні параметри роботи пристрою, за яких для комбінованого дефлекторного розпилювача коефіцієнт варіації становить ψ = 9,37% при p = 0,30 МПа, h = 0,90 м та d = 1,0 мм, що на 10,8% менше порівняно із серійним РД-4,0 (ψ = 10,5%). Для комбінованого струменевого розпилювача отримано ψ = 16,8% при p = 0,30 МПа, h = 0,90 м та d = 1,2 мм, що на 11,1% менше порівняно з серійним RD.05.SD5-b (ψ = 18,9%). Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої конструкції та доцільність її подальшого дослідження в польових умовах.

Результати польових досліджень підтвердили працездатність та експлуатаційну ефективність розробленого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив в умовах дії неконтрольованих зовнішніх факторів. За робочої швидкості агрегату 10 км/год, температури повітря 14°C та швидкості вітру до 5 м/с

комбінований дефлекторний пристрій забезпечив щільність покриття 110–118 шт/см² порівняно з 84–92 шт/см² у серійного РД-4,0, а комбінований струменевий – 72–77 шт/см² порівняно з 38–45 шт/см² у серійного RD.05.SD5-b. При цьому коефіцієнт покриття поверхні для дефлекторного пристрою становив 30,8 %, а для струменевого – 28,9 %, що перевищує відповідні показники серійних аналогів (25,6 та 24,2 %). Встановлено, що розроблений пристрій забезпечує формування краплин переважно раціонального для внесення рідких мінеральних добрив діапазону 300–700 мкм, частка якого за результатами аналізу становить 55–75% загальної кількості відбитків. Для комбінованих пристроїв середній діаметр за Фере становив 586 мкм для дефлекторного та 650 мкм для струменевого виконання. Індекс монолітності відбитків становив відповідно 0,83 та 0,80, що характеризує стабільність форми сформованих плям. Для комбінованого дефлекторного пристрою коефіцієнт круговості підвищився до 0,52 порівняно з 0,36 у серійного РД-4,0, що свідчить про більш стабільну форму відбитків краплин у польових умовах. Порівняння польових і стендових результатів також показало вищу стабільність характеристик комбінованого струменевого пристрою, для якого щільність покриття, середня площа відбитка та середній діаметр за Фере змінилися незначно. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої конструкції для підвищення стабільності та рівномірності внесення рідких мінеральних добрив в умовах реальної експлуатації.

7. На основі проведених досліджень та виробничої перевірки розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив (КАС-32) у ФОП «Боханченко І. С.» підтверджено його високу ефективність за швидкості руху 2,6–3,8 м/с і вітру до 6 м/с, що забезпечило зниження коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини на 2,1% у струменевому режимі та на 1,13% у дефлекторному, а також зменшення втрат добрив від випаровування та знесення на 1,02–2,23% завдяки стабілізації факела та формуванню краплин оптимального діаметра 300–700 мкм. На базі ФГ «ЛАРІНИ» виготовлено дослідну партію із 40 комбінованих пристроїв для дообладнання штангового обприскувача, які пройшли стендову перевірку, тоді як результати розробки в межах держбюджетної тематики № ДР 0125U002952 передано до ТОВ «Агромодуль» (м. Дніпро) для підготовки серійного випуску серії з 30 одиниць. Окрім

цього, практичні та наукові результати роботи успішно інтегровано в освітній процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) для підготовки здобувачів за спеціальностями «Агроінженерія» та «Машинобудування».

8. Техніко-економічна оцінка використання розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив показала, що його застосування забезпечує отримання питомого річного економічного ефекту на рівні 44 грн/га порівняно з базовим серійним варіантом за рахунок підвищення рівномірності поперечного розподілу рідини, оптимізації дисперсного складу краплин та зменшення втрат добрив від зносу і випаровування. Максимальної ефективності агрегат досягає при робочій швидкості 3,2 м/с (12 км/год), а додаткові капітальні вкладення повністю окупаються протягом першого ж виробничого сезону (термін окупності становить 0,22 року за базової площі обробітку 200 га).

Ключові слова: агрохімікати, добрива, рідкі мінеральні добрива, КАС, внесення, обприскування, розпилення, розподіл, рівномірність розподілу, ефективність, продуктивність, втрати, норма, параметри, фактори, вплив, оптимізація, технологічна система, технологічний матеріал, рослини, поле, господарство, механізовані роботи, планування механізованих робіт, обладнання, пристрій, машина, обприскувач, розбризкувач, дефлекторний розбризкувач, струменевий розбризкувач, розпилювач, форсунка, насадка, робочий орган, штанга, бак, подача, тиск, швидкість, потік, ширина, висота, діаметр, дросель, конструкція, ресурс роботи, знос, гідравлічний розрахунок, робота з рідиною, водопостачання, краплини, факел розпилу, покриття, щільність, коагуляція, частинка, польот, траєкторія, опір повітря, коефіцієнт шорсткості, число Рейнольдса, коефіцієнт варіації, залежності, рівняння, теорія, фізико-математична модель, математична модель, імітаційна модель, моделювання, чисельне моделювання, метод дискретних елементів, DEM, Лагранжевий багатофазний підхід, метод скінченних елементів, Simcenter Star-CCM+, програмне забезпечення, поверхня відгуку, алгоритм, експеримент, дослідження, лабораторний випробувальний стенд, водочутливий папір, ImageJ.

ANNOTATION

Lepet Ye. I. Substantiation of Parameters and Operating Modes of the Device for Liquid Mineral Fertilizer Application. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 133 «Industrial Engineering» (13 «Mechanical Engineering») – Dnipro State Agrarian and Economic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro – 2026.

The aim of the study is to improve the efficiency and quality of liquid mineral fertilizer application by developing and scientifically substantiating the design and operating parameters of a combined sprayer with deflector and jet operating modes based on numerical and experimental investigations of the spray pattern formation process.

The object of the study is the technological process of application and distribution of liquid mineral fertilizers using a combined spraying device mounted on a boom sprayer.

The subject of the study is the patterns of interaction and transformation of the hydrodynamic flow of the working fluid within the elements of the combined device, as well as the dependence of application quality indicators on the design, technological, and operating parameters of the device.

Research methods. Theoretical studies were based on the fundamental principles of hydrodynamics, jet flow and deflector surface theory, and continuum mechanics, using methods of systems analysis, differential and numerical modeling implemented in the Simcenter STAR-CCM+ software environment. Experimental studies were conducted under laboratory and field conditions using both standard methods in accordance with applicable DSTU standards and specially developed software and methodological tools based on digital image analysis and binary matrix analysis of droplet stain patterns in the ImageJ software environment. Experimental data processing, statistical hypothesis testing using the Cochran, Fisher, and Student criteria, and regression model development were performed using mathematical statistics methods with Wolfram Cloud and Microsoft Excel.

For the first time, a set of mathematical relationships in the form of second-order regression equations was established to describe the combined effects of the key factors of

the combined sprayer, including working pressure, interchangeable orifice diameter, boom height, and design parameters, on the target quality criteria: droplet size distribution, droplet deposition density on the target surface, and the overall coefficient of variation of liquid distribution. These relationships enable optimization of the fertilizer application process within the specified agronomic requirements.

For the first time, the hydrodynamic patterns of transformation and stabilization of the gas–liquid spray pattern during preliminary flow throttling and its interaction with the curved deflector surface of the combined device were established. This provided a theoretical basis for determining the parameters required to form droplets of appropriate mass and an optimal droplet size range (300–700 μm) to minimize liquid drift.

Further developed was the software and methodological framework for assessing droplet size distribution and the compactness of liquid fertilizer droplet stains based on binary matrix analysis of digital images of the spray pattern. This approach enabled accurate identification of the adaptive effect of flow transformation under the dynamic resistance conditions of an open agricultural field.

The developed combined spraying device for boom sprayers successfully underwent industrial testing and was implemented in the process of applying liquid mineral fertilizers at agricultural enterprises (SP «Bohanchenko I. S.», FE «LARINI»). Comparative tests confirmed that the proposed device improves the uniformity of working-fluid distribution across the boom width: in jet mode, the coefficient of variation of transverse distribution (ψ) was 2.1% lower than that of the RD.05.SD5-b commercial analogue, while in deflector mode it was 1.13% lower than that of the baseline RD-4.0 nozzle. The research materials and the complete set of design and technological documentation for the prototype were accepted for research and industrial implementation by the Design and Technology Department of AgroMODUL LLC (Dnipro) for modernization of the liquid-distribution unit range and preparation of production facilities for small-batch manufacturing of new adaptive systems. In addition, the developed methods for laboratory and bench evaluation of the spray plume hydrodynamic characteristics and digital image processing algorithms have been integrated into the educational process of the Dnipro State Agrarian and Economic University (DSAEU) during the training of higher education seekers at the first (bachelor's)

and second (master's) levels in the specialties H7 «Agroengineering» and G11 «Mechanical Engineering».

The analysis confirmed the prospects of improving liquid mineral fertilizer application technologies in Ukraine. It was established that improving their efficiency largely depends on spray pattern quality, uniformity of working-fluid distribution, and the design and operating parameters of spraying devices. The feasibility of improving the combined nozzle design was substantiated to ensure high uniformity and application efficiency in modern precision-farming technologies. Patent and information analysis established that the efficiency of liquid mineral fertilizer application is determined by the design and operating parameters of the nozzle, which affect droplet size distribution, uniformity of distribution, and drift losses. The need to develop a universal nozzle capable of adapting to different application conditions and methods was substantiated. A design and technological scheme of a combined nozzle with two operating modes—deflector and jet—was proposed, enabling controlled spray-pattern formation, adjustment of droplet size distribution, and improved uniformity of working-fluid application. The developed design is compatible with existing boom sprayers and provides a basis for further optimization of its design and operating parameters.

The theoretical studies substantiated an approach to numerical simulation of spray-pattern formation using an enhanced Eulerian–Lagrangian ELSA model in Simcenter STAR-CCM+. The proposed dynamic transition from the Eulerian to the Lagrangian phase based on criteria of droplet sphericity and characteristic diameter provides an adequate description of the primary breakup of the continuous liquid jet and subsequent motion of the dispersed phase. The developed physical and mathematical framework and the adopted transition criteria provide a basis for numerical investigation of the effects of the nozzle’s design and operating parameters on the coefficient of variation of spray intensity and spray-pattern angle, as well as for determining their rational values. The resulting model was used as a tool for substantiating the design and operating modes of the combined nozzle to ensure the required quality of working-fluid distribution.

Numerical simulations yielded second-order mathematical relationships for evaluating the coefficient of variation of spray intensity ψ and spray-pattern angle β as

functions of the design and operating parameters of the combined nozzle. A nonlinear influence of the factors and statistically significant interactions between them were established. For the jet mode, the effects of the angle between jet orifices φ, jet-orifice diameter δ, number of orifices N, operating pressure p, boom height h, and throttle diameter d were investigated. For the deflector mode, the effects of the distance from the outlet channel to the deflector center of curvature l, deflector-surface radius of curvature r, deflector-edge thickness t, operating pressure p, boom height h, and throttle diameter d were established. The resulting relationships were used for multi-objective optimization based on minimizing ψ/β, yielding the following rational parameters: for the jet mode, φ = 26.6°, δ = 2.2 mm, N = 5; for the deflector mode, l = 3.3 mm, r = 5.8 mm, and t = 0.5 mm.

Laboratory experimental studies confirmed the operability of the developed combined device for liquid mineral fertilizer application and established the patterns governing its hydrodynamic characteristics. Visual observations showed that at an operating pressure of 0.20–0.30 MPa, the device provides stable and symmetrical spray-pattern formation with smooth overlap of adjacent patterns, whereas at 0.15 MPa unstable atomization and liquid discharge in the form of continuous jets were observed. Leakage tests confirmed the absence of leaks at the interfaces between structural components throughout the investigated pressure range. The volumetric flow rate of the working fluid was found to increase systematically with increasing operating pressure and throttle-orifice diameter. Deviations in the flow characteristics of the combined device compared with the standard RD-4.0 and RD.05.SD5-b nozzles were 2.3–3.2% and 1.7–3.1%, respectively, which do not exceed the permissible value of ±5% and confirm the stability of its hydraulic characteristics.

Based on the results of multifactor experimental studies, second-order mathematical models were obtained describing the dependence of the coefficient of variation of the transverse liquid distribution ψ on the operating pressure p, boom height h, and variable throttle diameter d for both standard and developed combined nozzles. Verification of the models using the Cochran, Student’s, and Fisher’s criteria confirmed the homogeneity of variances, statistical significance of the coefficients, and adequacy of the obtained equations, indicating the reliability of the established relationships. Response surface analysis revealed a significant interactive and nonlinear effect of the studied factors on the uniformity of

transverse liquid distribution. Rational operating parameters were determined, at which the coefficient of variation for the combined deflector nozzle was ψ = 9.37% at p = 0.30 MPa, h = 0.90 m, and d = 1.0 mm, which is 10.8% lower than that of the standard RD-4.0 nozzle (ψ = 10.5%). For the combined jet nozzle, ψ = 16.8% was obtained at p = 0.30 MPa, h = 0.90 m, and d = 1.2 mm, which is 11.1% lower than that of the standard RD.05.SD5-b nozzle (ψ = 18.9%). The obtained results confirm the effectiveness of the proposed design and the feasibility of its further investigation under field conditions.

The results of field studies confirmed the operability and operational efficiency of the developed combined device for liquid mineral fertilizer application under uncontrolled external conditions. At an operating speed of 10 km/h, an air temperature of 14 °C, and wind speeds of up to 5 m/s, the combined deflector device provided a coverage density of 110–118 spots/cm² compared with 84–92 spots/cm² for the standard RD-4.0 nozzle, while the combined jet device provided 72–77 spots/cm² compared with 38–45 spots/cm² for the standard RD.05.SD5-b nozzle. The surface coverage coefficient was 30.8% for the deflector device and 28.9% for the jet device, exceeding the corresponding values for the standard nozzles (25.6% and 24.2%, respectively). It was established that the developed device predominantly produces droplets within the 300–700 μm range, which is considered suitable for liquid mineral fertilizer application; this fraction accounted for 55–75% of the total number of imprints. For the combined devices, the mean Feret diameter was 586 μm for the deflector configuration and 650 μm for the jet configuration. The imprint solidity index was 0.83 and 0.80, respectively, indicating stable shapes of the formed droplet imprints. For the combined deflector device, the circularity coefficient increased to 0.52 compared with 0.36 for the standard RD-4.0 nozzle, indicating a more stable shape of droplet imprints under field conditions. Comparison of field and laboratory bench results also demonstrated greater stability of the characteristics of the combined jet device, for which coverage density, mean imprint area, and mean Feret diameter changed only slightly. The obtained results confirm the feasibility of using the proposed design to improve the stability and uniformity of liquid mineral fertilizer application under actual operating conditions.

Based on the conducted research and production testing of the developed device for applying liquid mineral fertilizers (UAN-32) at the SP «Bohanchenko I. S.», its high

efficiency was confirmed at a travel speed of 2.6–3.8 m/s and a wind speed of up to 6 m/s, which ensured a reduction in the coefficient of variation of the transverse liquid distribution by 2.1% in the stream mode and by 1.13% in the deflector mode, as well as a decrease in fertilizer losses from evaporation and drift by 1.02–2.23% due to plume stabilization and the formation of droplets with an optimal diameter of 300–700 μm. On the basis of the farm «LARINI», an experimental batch of 40 combined devices for retrofitting a boom sprayer was manufactured and underwent bench testing, while the research results within the framework of the state-funded budget topic No. DR 0125U002952 were transferred to LLC «Agromodule» (Dnipro) to prepare for the serial production of a batch of 30 units. In addition, the practical and scientific results of the work have been successfully integrated into the educational process of the Dnipro State Agrarian and Economic University (DSAEU) for the training of students in the specialties «Agroengineering» and «Mechanical Engineering».

The technical and economic assessment of using the developed device for applying liquid mineral fertilizers showed that its application ensures an annual specific economic effect of 44 UAH/ha compared to the baseline serial option due to increased uniformity of transverse liquid distribution, optimization of the droplet dispersed composition, and reduction of fertilizer losses from drift and evaporation. The unit achieves maximum efficiency at a working speed of 3.2 m/s (12 km/h), and additional capital investments are fully paid back during the first production season (the payback period is 0.22 years at a baseline cultivation area of 200 ha).

Keywords: agrochemicals, fertilizers, liquid mineral fertilizers, UAN, application, spraying, atomization, distribution, uniformity of distribution, efficiency, productivity, losses, rate, parameters, factors, influence, optimization, technological system, technological material, plants, field, farm, mechanized operations, planning of mechanized operations, equipment, device, machine, sprayer, sprinkler, deflector sprinkler, jet sprinkler, atomizer, nozzle, attachment, working element, boom, tank, flow rate, pressure, velocity, flow, width, height, diameter, throttle, design, service life, wear, hydraulic calculation, fluid handling, water supply, droplets, spray pattern, coverage, density, coagulation, particle, flight, trajectory, air resistance, roughness coefficient, Reynolds number, coefficient of

variation, dependencies, equations, theory, physical and mathematical model, mathematical model, simulation model, modeling, numerical modeling, discrete element method, DEM, Lagrangian multiphase approach, finite element method, Simcenter STAR-CCM+, software, response surface, algorithm, experiment, research, laboratory test bench, water-sensitive paper, ImageJ.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Статті у наукових фахових виданнях України зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування:

1. Кобець О. М., Пономаренко Н. О., **Лепеть Є. І.** Стан механізації внесення КАС в Україні. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2024. Вип. 54. С. 77–83. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.77-83 *(Здобувачу належить моніторинг ринку сучасних технічних засобів, аналіз конструктивних недоліків існуючих розпилювальних систем для внесення карбамід-аміачної суміші).*

2. Kobets O., **Lepet Ye.** Results of experimental studies of jet nozzles for the application of liquid mineral fertilizers. *Engineering, Energy, Transport AIC.* 2025. Vol. 4, No. 131. P. 32–38. https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-4. *(Здобувачу належить проведення стендових досліджень струменевих розпилювачів, обробка отриманих даних та аналіз закономірностей розподілу рідини).*

3. 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. Вип. 13(44). С. 212–218. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).212-218. *(Здобувачу належить проведення лабораторних експериментів на спеціалізованому стенді та статистична обробка масивів експериментальних даних).*

4. Кобець, О. М., **Лепеть, Є. І.** Результати порівняльних досліджень пристрою для внесення РМД. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2026. Вип. 56. С. 69–77. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.69-77. *(Здобувачу належить проведення виробничих досліджень та цифровий аналіз результатів)*

Патент України на корисну модель:

5. Кобець О. М., Лепеть Є. І. Дефлекторний розпилювач. Патент на корисну модель № 164203 UA, МПК A01M 7/00, u 2025 04632; заявл. 22.09.2025. Опубл. 09.09.2026. Бюл. № 36/2026. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1944278/ *(Здобувачу належить розробка конструктивно-технологічної схеми розпилювача)*.

Тези доповідей на конференціях:

6. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Аналіз способів внесення рідких мінеральних добрив. Наукові основи адаптивного землеробства: матеріали Міжнародної науковопрактичної конференції з нагоди 100-річчя від дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора, академіка ФЕДОРА ТРОХИМОВИЧА МОРГУНА, 90-річчя Агрономічного факультету Дніпровського державного аграрно-економічного університету та Міжнародного дня здоров'я рослин (16–17 травня 2024 р., м. Дніпро). Дніпро: ДДАЕУ, 2024. С. 373–374. *(Здобувачу належить збір та систематизація інформації щодо існуючих способів внесення рідких мінеральних добрив)*

7. **Лепеть Є. І.** Обґрунтування конструкції комбінованого розбризкувача для внесення КАС. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2024. С. 56–58.

8. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Вибір розбризкувачів для внесення КАС. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 81–83. *(Здобувачу належить аналіз критеріїв вибору розбризкувачів для підживлення КАС)*.

9. Кобець О. М., Пономаренко Н. О., **Лепеть Є. І.** Стан механізації внесення КАС в Україні. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2024 р.). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024.

С. 193–199. *(Здобувачу належить збір даних щодо використання технічних засобів для для внесення рідких мінеральних добрив)*.

10. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Оцінка впливу висоти штанги на якість поперечного розподілу КАС струменевими розбризкувачами. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 219–221. *(Здобувачу належить аналіз впливу висоти встановлення штанги обприскувача на показники нерівномірності розпилу)*.

11. **Лепеть Є. І.** Результати експериментальних досліджень розбризкувачів для внесення рідких мінеральних добрив. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2025. С. 51–53.

12. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Класифікація та принципи роботи обприскувачів та розбрискувачів. The 12th International scientific and practical conference «European congress of scientific discovery» (November 10–12, 2025) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2025. P. 17–20. *(Здобувачу належить систематизація та класифікація сучасних обприскувачів і розпилювачів).*

ЗМІСТ

ВСТУП 21
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 27
1.1 Тенденції споживання мінеральних добрив в Україні та світі 27
1.2 Агротехнічні особливості застосування рідких мінеральних добрив 30
1.3 Аналіз сучасних технологій та обладнання для внесення рідких мінеральних добрив 32
1.4 Класифікація та принципи роботи розпилювачів для внесення РМД 39
1.5 Огляд експериментальних та аналітичних досліджень розпилювачів 45
1.6 Обгрунтування конструктивно-технологічної схеми пристрою для внесення рідких мінеральних добрив 62
1.7 Висновки з розділу 65
1.8 Мета і задачі досліджень 67
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПОТОКУ РОБОЧОЇ РІДИНИ В КОМБІНОВАНОМУ РОЗПИЛЮВАЧІ 69
2.1 Постановка задачі теоретичних досліджень 69
2.2 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання 72
2.3 Методика чисельного моделювання 82
2.4 Результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі 94
2.5 Результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі 105
2.6 Висновки з розділу 115
3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВНЕСЕННЯ РІДКИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ 118
3.1 Мета і програма досліджень 118
3.2 Методика експериментальних досліджень пристрою для внесення рідких мінеральних добрив 119

3.2.1 Виготовлення дослідного зразка пристрою 119
3.2.2 Обладнання та прилади 121
3.2.3 Методика проведення експериментальних досліджень пристрою для внесення рідких мінеральних добрив 125
3.3 Методика польових досліджень пристрою для внесення рідких мінеральних добрив 128
3.4 Статистичний аналіз експериментальних даних 133
3.5 Висновки з розділу 135
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМБІНОВАНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВНЕСЕННЯ РІДКИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ 137
4.1 Результати експериментальних досліджень 137
4.1.1 Візуальний контроль та оцінка геометрії факела розпилу 137
4.1.2 Дослідження витрати рідини комбінованими пристроями 141
4.2. Результати експериментальних досліджень комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив 143
4.3 Результати польових досліджень пристрою 148
4.4 Порівняння результатів експериментальних досліджень із чисельним моделюванням 158
4.5 Висновки з розділу 161
5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 164
5.1 Впровадження результатів досліджень 164
5.2 Техніко-економічна ефективність 165
5.3 Висновки з розділу 168
ВИСНОВКИ 169
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 173
ДОДАТКИ 195

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному ресурсозберігаючому та точному землеробстві зменшення невиробничих втрат поживних речовин є першочерговим завданням. Обґрунтованим трендом інтенсифікації рослинництва є перехід на ефективні рідкі форми мінеральних добрив, які гарантують високу доступність елементів живлення в умовах дефіциту грунтової вологи. Проте повномасштабне впровадження цієї технології наразі стримується через конструктивну недосконаліть існуючих гідродинамічних розпилювачів. Їх робота часто супроводжується високою нерівномірністю дозування по ширині захвату, ризиком знесення дрібнодисперсних краплин повітряними потоками за межі поля, або навпаки – виникненням важких хімічних опіків рослин через формування надмірно великих фракцій рідини та концентрованих струменів.

Це зумовлює гостру науково-практичну потребу в розробці адаптивних технічних засобів розподілу, здатних забезпечувати внутрішню гідродинамічну стабілізацію робочого потоку та оптимізувати параметри й дисперсний склад факела розпилу. Нові пристрої повинні гарантувати стабільну геометрію розподілу рідини та монодисперсність краплин в межах агротехнічних вимог (300-700 мкм), мінімізуючи негативний вплив динамічних коливань тиску в нагнітальній системі, кінематичних коливань штанги обприскувача під час руху та протидію неконтрольваним збурюючим факторам.

Інтеграція дослідження в наукові програми. Матеріали дисертації є складовою частиною планової наукової тематики Дніпровського державного аграрно-економічного університету за напрямом: «Підвищення ефективності механізації технологічних процесів у рослинництві шляхом розробки та впровадження енергетичних засобів і машин для реалізації концепції точного землеробства» (№ ДР 0125U002952, 2025–2030 рр.).

Метою роботи *є* підвищення ефективності та якості внесення рідких мінеральних добрив шляхом розроблення й наукового обґрунтування конструктивно-режимних параметрів комбінованого розпилювача з дефлекторним і струменевим

режимами роботи на основі чисельного та експериментального дослідження процесу формування факела розпилу.

Наукова гіпотеза досліджень полягає в тому, що поєднання в одному розпилювачі дефлекторного та струменевого способів формування факела, за умови науково обґрунтованого вибору конструктивних і режимних параметрів, дасть змогу керувати просторовою структурою та дисперсністю факела, підвищити рівномірність і стабільність розподілу робочої рідини, збільшити якість покриття цільової поверхні та зменшити негативний вплив зовнішніх факторів порівняно із серійними розпилювачами.

Задачі дослідження:

– проаналізувати сучасні технології та технічні засоби внесення рідких мінеральних добрив, конструкції розпилювачів і визначити основні фактори, що впливають на якість формування та розподілу факела;

– обґрунтувати конструктивно-технологічну схему комбінованого розпилювача з можливістю роботи у дефлекторному та струменевому режимах;

– розробити фізико-математичну модель формування факела на основі удосконаленої ELSA–DEM моделі та встановити критерії переходу від суцільної до дискретної фази робочої рідини;

– встановити закономірності впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт варіації інтенсивності факела та кут його розкриття, отримати й статистично обґрунтувати математичні моделі другого порядку;

– визначити раціональні конструктивні та режимні параметри комбінованого розпилювача шляхом багатокритеріальної оптимізації;

– експериментально дослідити гідравлічні, розподільні та дисперсні характеристики розробленого пристрою, перевірити адекватність математичних моделей і порівняти його характеристики із серійними розпилювачами;

– перевірити працездатність та ефективність комбінованого розпилювача в польових умовах і оцінити стабільність формування краплин та рівномірність покриття цільової поверхні;

– оцінити ефективність упровадження розробленої конструкції та визначити її техніко-економічну доцільність.

Об’єкт дослідження – технологічний процес внесення та розподілу рідких мінеральних добрив комбінованим розпилювальним пристроєм до штангового обприскувача.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії та трансформації гідродинамічного потоку робочої рідини в елементах комбінованого пристрою, а також залежність показників якості внесення від конструктивно-технологічних і режимних параметрів пристрою.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження базувалися на основних положеннях гідродинаміки, теорії струменів і дефлекторних поверхонь, механіки суцільного середовища, з використанням методів системного аналізу, диференціального та чисельного моделювання з залученням програмного середовища Simcenter Star-CCM+. Експериментальні дослідження виконувалися в лабораторних та виробничих умовах із застосуванням як стандартних методик згідно з діючими ДСТУ, так і спеціально розроблених програмно-методичних комплексів із залученням цифрового аналізу та бінарного матричного аналізу відбитків плям. Обробка експериментальних даних, перевірка статистичних гіпотез за критеріями Кохрена, Фішера і Стьюдента, а також побудова регресійних моделей здійснювалися методами математичної статистики з використанням прикладного програмного забезпечення Wolfram Cloud та Microsoft Excel.

Для стилістичного редагування, уточнення формулювань, оформлення списку використаних джерел, перекладу англійською мовою тощо використовувався інструмент штучного інтелекту Google Gemini (Google Gemini 3.1 Pro) [192]. Його застосування обмежувалося мовно-стилістичним опрацюванням тексту з метою підвищення чіткості, читабельності та академічної якості рукопису. Використання штучного інтелекту жодним чином не вплинуло на результати дослідження, їх інтерпретацію чи наукові висновки

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше:

– встановлено комплекс математичних залежностей у вигляді квадратичних регресійних рівнянь, які відображають характер спільного впливу ключових чинників комбінованого розпилювача: величини робочого тиску, діаметра змінних дроселів, висоти розташування штанги та конструктивних параметрів над цільовою поверхнею на цільові критерії якості: рівень дисперсності й густоту осадження краплин на поверхні, а також загальний коефіцієнт варіації розподілу рідини, що дозволяє оптимізувати процес внесення добрив у межах регламентованих агровимог;

– встановлено гідродинамічні закономірності трансформації та стабілізації газорідинного факела розпилу в процесі попереднього дроселювання потоку та його набігання на криволінійну дефлекторну поверхню комбінованого пристрою, що дозволило теоретично обґрунтувати параметри формування краплин раціональної маси та оптимального дисперсного складу (300-700 мкм) задля мінімізації дрейфу рідини.

Отримав подальший розвиток:

– програмно-методичний апарат оцінювання дисперсного складу та монолітності відбитків краплин рідких мінеральних добрив на основі бінарного матричного аналізу цифрових зображень факела розпилу, що дозволило з високою точністю ідентифікувати адаптивний ефект трансформації потоку за умов динамічного опору відкритого агрофону.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений комбінований розпилювальний пристрій для штангових обприскувачів пройшов успішну виробничу апробацію та впроваджений у технологічний процес внесення рідких мінеральних добрив в умовах агропідприємств (ФОП «Боханченко І. С», ФГ «ЛАРІНИ»). Результати порівняльних випробувань підтвердили, що застосування запропонованого пристрою підвищує рівномірність розподілу робочої рідини по ширині захвату агрегату: у струменевому режимі коефіцієнт варіації поперечного розподілу (ψ) виявився на 2,1% нижчим за показник промислового аналога RD.05.SD5-b, а в дефлекторному режимі – на 1,13% нижчим за базовий розпилювач РД-4,0. Матеріали досліджень та повний пакет конструкторсько-технологічної

документації на дослідний зразок прийняті до науково-виробничого впровадження у конструкторсько-технологічному відділі ТОВ «АгроМОДУЛЬ» (м. Дніпро) для модернізації лінійки вузлів розподілу рідини та підготовки потужностей до дрібносерійного виробництва нових адаптивних систем. Крім того, розроблені методики лабораторно-стендового оцінювання гідродинамічних характеристик факела розпилу та алгоритми обробки цифрових зображень інтегровано в навчальний процес ДДАЕУ під час підготовки здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти за спеціальностями H7 «Агроінженерія» та G11 «Машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та експериментальні результати досліджень, що становлять основу праці, отримані автором самостійно. Постановка загальних задач та обговорення результатів здійснювалися спільно з науковим керівником. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [34, 59] – моніторинг ринку та аналіз недоліків систем внесення для внесення рідких мінеральних добрив; [29, 100, 187] – збір та аналіз інформації щодо агротехнічних особливостей внесення добрив, критеріїв вибору розпилювачів; [166, 188] – обґрунтування конструктивно-технологічної схеми комбінованого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив; [165, 183, 184, 186] – розробка методик і проведення лабораторно-стендових досліджень розпилювачів; у [185] – організація та проведення польових випробувань із цифровим аналізом щільності покриття поверхні краплинами.

Апробація матеріалів дослідження. Ключові положення, наукові результати та практичні висновки дисертаційної роботи пройшли всебічне обговорення на науково-практичних заходах: Міжнародній науковопрактичній конференції з нагоди 100-річчя від дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора, академіка ФЕДОРА ТРОХИМОВИЧА МОРГУНА, 90-річчя Агрономічного факультету Дніпровського державного аграрно-економічного університету та Міжнародного дня здоров’я рослин (Україна, м. Дніпро, 16-17 травня 2024 року); XXV Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Україна, м. Київ, 17-19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і

природокористування України. Київ; III Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва» (Україна, м. Дніпро, 15 листопада 2024 р.); XXVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Україна, м. Київ, 17-18 жовтня 2025 р.); IV Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва» (Україна, м. Дніпро, 21 листопада 2025 р.); The 12th International scientific and practical conference «European congress of scientific discovery» (Spain, Madrid, 10-12 November 2025).

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 12 наукових праць, які відображають його основний зміст. Серед них: 4 статті у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»), 1 патент України на корисну модель, а також 7 матеріалів доповідей і тез у збірниках міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Наукова праця включає вступну частину, п’ять взаємопов’язаних розділів, висновки, список використаних джерел та матеріали додатків. Загальний обсяг дисертації разом із супровідними матеріалами налічує 233 сторінок. При цьому безпосередньо виклад основного тексту дослідження зосереджено на 194 сторінках. Ілюстративний матеріал та узагальнені експериментальні дані представлені у вигляді 65 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел займає 22 сторінки і охоплює 192 найменування. Додаткові матеріали, які підтверджують практичну цінність роботи, винесено в 8 окремих додатках, які сукупно займають 39 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Тенденції споживання мінеральних добрив в Україні та світі

В світі згідно з даними [1–3] глобальна політика, економіка, конфлікти та екологічний тиск вплинули на ринок добрив в останні роки, це призвело до зниження попиту в період 2022–2024 рр. Відновлення попиту на добрива відбулося у 2024 році, зумовлене покращенням доступності для фермерів та успішним перенаправленням торгівлі (рис. 1.1). Після зниження протягом двох років поспіль, глобальне використання добрив зросло на 4,3% у 2023 фінансовому році, на 2,5% у 2024 фінансовому році та на 2,2% у 2025 фінансовому році. Загальне споживання на рівні 205 млн тонн у діючій речовині за 2025 фінансовий рік, що перевищує попередній рекорд у 201,5 млн тонн у 2020 році.

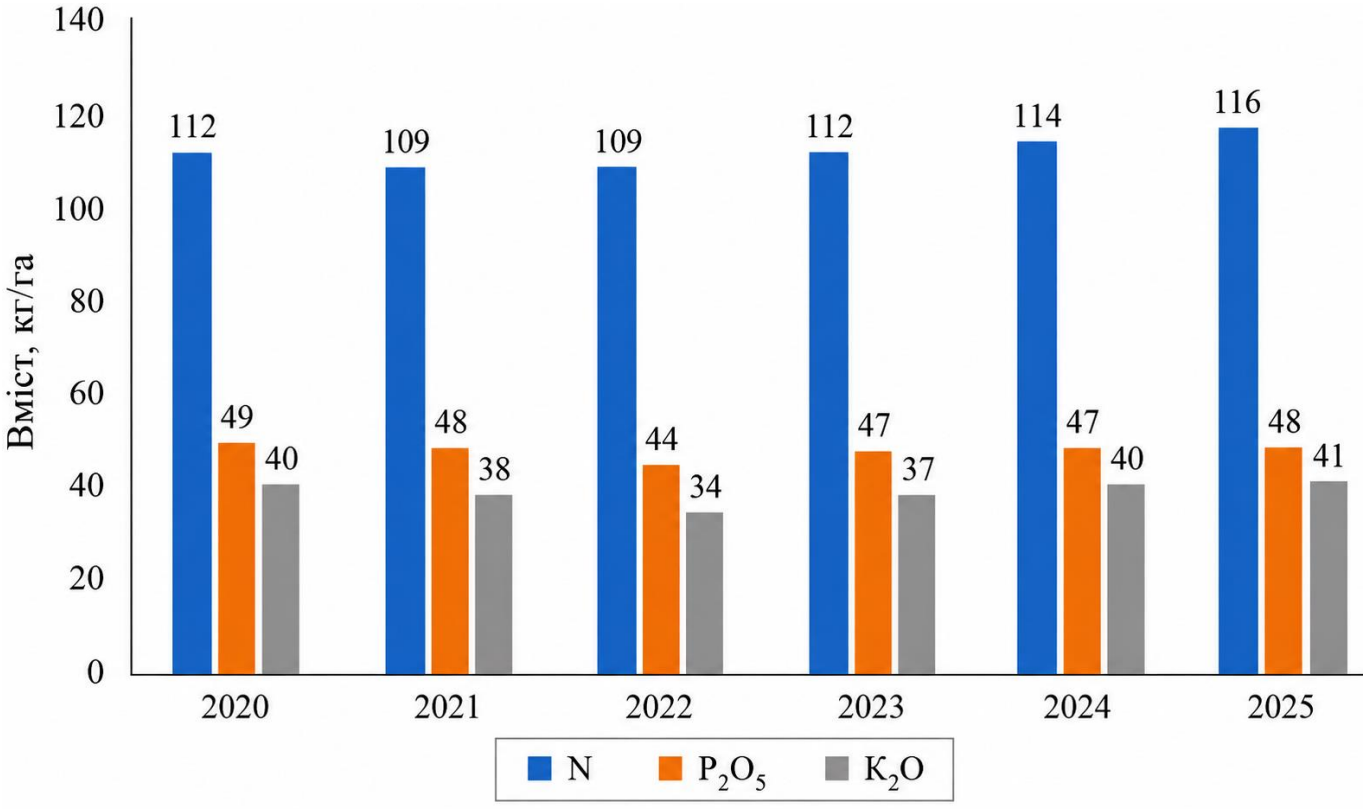


Рисунок 1.1 – Світове споживання добрив, млн тонн

У відповідності до прогнозів IFA [1] очікується споживання азотних добрив на рівні 1,9% на рік до 2028 року. Очікується, що темпи зростання споживання фосфатів становитимуть 2,8% на рік, а калію – 3,7%.

Якщо ж розглядати споживання добрив в розрізі країн то вона вимірюється кількістю поживних речовин для рослин, яка вноситься на одиницю орних земель (кг/га) [5–7].

Згідно FAO [8] добрива залежно від вмісту діючих речовин поділяються на: азотні (N), калійні (K_2O) та фосфорні (P_2O_5).

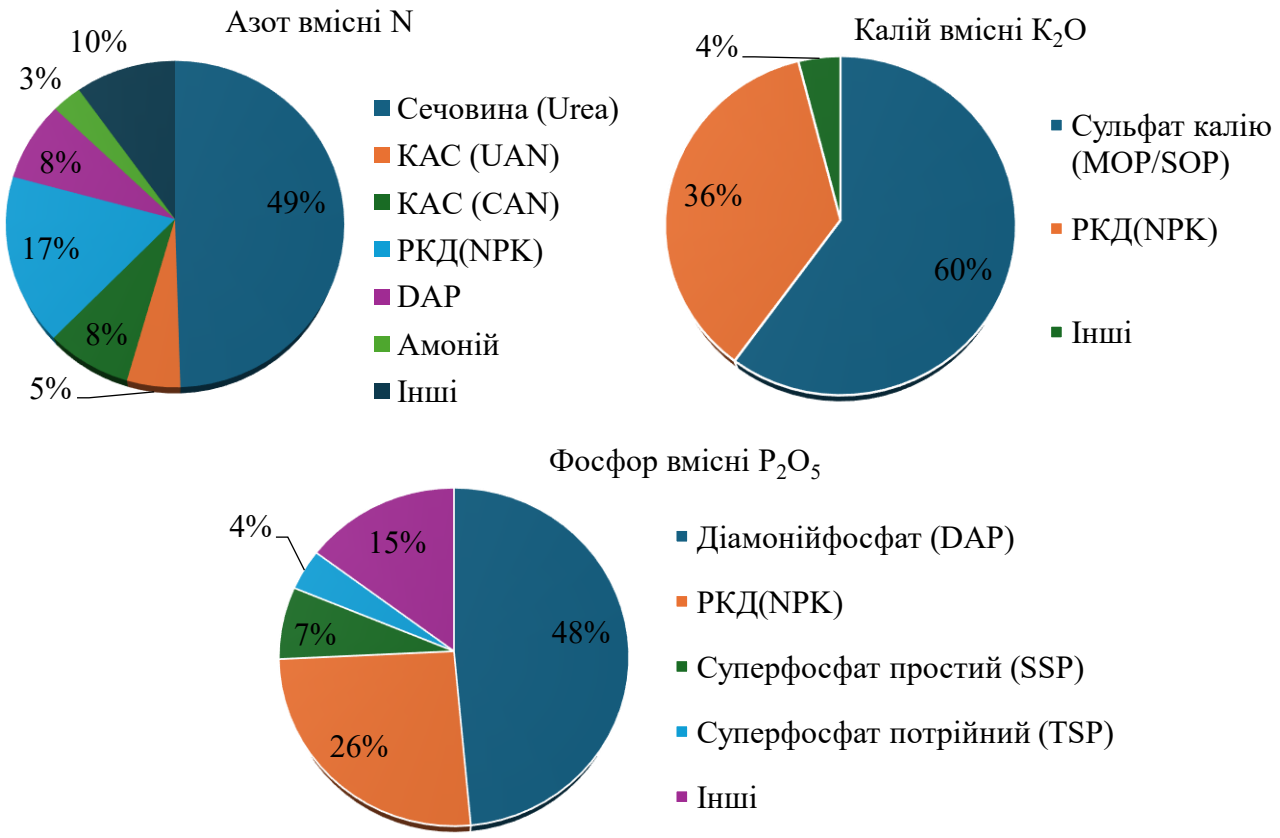


Рисунок 1.2 – Відсотковий розподіл добрив в світі на 2025 рік

На рис 1.2 представлені у відсотковому співвідношені розподіл найбільш популярних мінеральних добрив по групам за 2025 рік [2]. При цьому сечовина, діамонійфосфат (DAP) та муріат калію (MOP) мають найбільшу частку ринку та широко продаються по всьому світу. Значним попитом користуються також рідкі комлексні добрива (РКД) та карбамід-аміачна суміш (КАС).

Розглянемо рівень внесення мінеральних добрив у перерахунку на кілограми поживних речовин на один гектар орних земель (кг/га) для низки європейських країн. Відповідно до даних рис 1.3 [5–6] найвищі значення спостерігаються у країнах Західної та Північно-Західної Європи, де рівень внесення перевищує 240–260 кг/га (Бельгія, Нідерланди, Люксембург). Це свідчить про високоінтенсивне, технологічно розвинене землеробство, яке характеризується високою врожайністю та великими обсягами виробництва на одиницю площі. Дещо нижчі, але все ще високі показники (понад 150 кг/га) демонструють такі країни, як Німеччина, Польща, Чехія, Швейцарія, Австрія, що також указує на стабільно інтенсивне застосування мінеральних добрив.

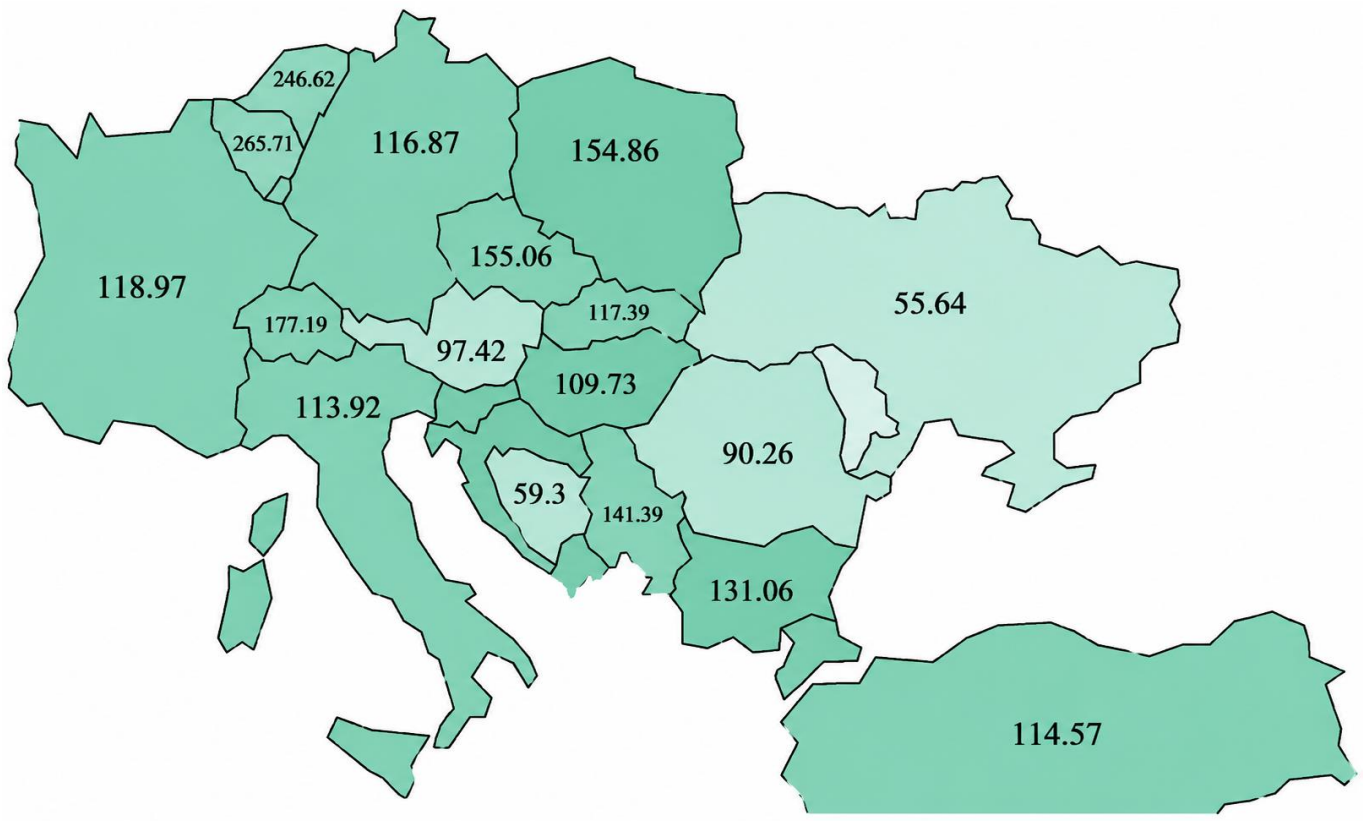


Рисунок 1.3 – Рівень внесення добрив (кг/га) країн Європи

Середній рівень використання добрив (90–140 кг/га) характерний для країн Центральної та Південної Європи – Угорщини, Румунії, Болгарії, Італії, Словенії, Хорватії. Цей показник свідчить про помірно інтенсивну модель ведення рослинництва, де внесення добрив збалансоване з економічними можливостями

аграрного сектору та структурою посівів. Низькі значення (приблизно 40-60 кг/га) зафіксовані у Молдові, Україні та деяких країнах Балканського регіону. Така ситуація вказує на нижчу забезпеченість поживними речовинами, знижену інтенсивність вирощування культур, а подекуди – на структурні проблеми аграрного виробництва, обмежену доступність мінеральних добрив або наявність значної частки екстенсивного землеробства.

В Україні після кризи 2022–2024 рр. відбувається поступове відновлення рівня внесення добрив до воєнних часів. Найвищі показники були у 2021 році на рівні 78,5 кг/га, найнижчі у 2023 – 42,5 кг/га [6] (рис 1.4).

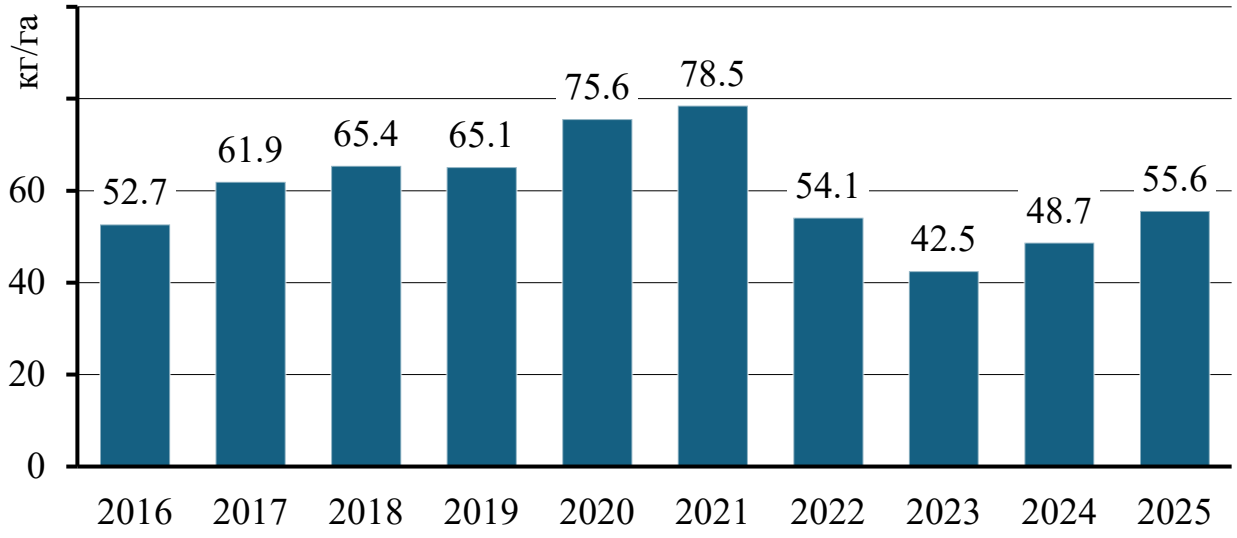


Рисунок 1.4 – Динаміка зміни внесення мінеральних добрив в Україні по роках

1.2 Агротехнічні особливості застосування рідких мінеральних добрив

Рідкі мінеральні добрива (РМД) набули широкого поширення у світовій та європейській практиці завдяки високій агрохімічній ефективності, точності дозування та технологічній зручності. До найпоширеніших форм таких добрив належать КАС, аміачна вода, РКД та суспензійні форми [1, 9–10]. Їх застосування забезпечує рівномірність внесення, мінімізацію втрат елементів живлення та можливість

поєднання з іншими операціями – зокрема, з захистом рослин (гербізацією) або поливом (фертигацією).

Основними агротехнічними перевагами РМД є висока доступність поживних речовин, швидка міграція у ґрунтовому середовищі та можливість локального живлення у прикореневій зоні. Азотні рідкі добрива, характеризуються стабільністю, відсутністю втрат у вигляді пилу та ефективним засвоєнням рослинами [11–12].

Ефективність використання рідких добрив залежить від способу внесення [13] (підґрунтове, поверхневе, листкове), глибини загортання, погодних умов та властивостей ґрунту. Дослідження підтверджують, що локальне внесення азотних РМД на глибину 5-12 см знижує втрати азоту від випаровування та денітрифікації, водночас забезпечуючи оптимальне живлення рослин у фазах інтенсивного росту [14–15]. Для зернових культур найбільш ефективним є внесення КАС у фазах кущення й виходу в трубку, тоді як для кукурудзи та соняшнику – підґрунтове внесення у міжряддя [16–18].

Карбамід-аміачні суміші широко застосовують у бакових сумішах із гербіцидами, підвищуючи ефективність проникнення діючих речовин у рослини. Водночас European Chemicals Agency (ECHA) зазначає необхідність дотримання норм безпечного змішування, оскільки концентровані азотні суміші можуть взаємодіяти з окремими пестицидами, утворюючи небажані сполуки [19].

Ґрунтові умови відіграють ключову роль у ефективності застосування РМД [20]. На легких супіщаних ґрунтах рідкі добрива швидше проникають у кореневий шар, тоді як на важких глинистих ґрунтах локальне внесення необхідне для мінімізації поверхневих втрат. Згідно з даними USDA (2023), ефективність використання азоту з UAN (КАС) може досягати 70-75%, тоді як для твердих добрив, таких як аміачна селітра, цей показник становить 60-63% [21].

У системах точного землеробства рідкі добрива демонструють особливо високий потенціал. Дослідження показують, що поєднання РМД зі змінними нормами внесення (VRA – Variable Rate Application) дозволяє знизити витрату, за рахунок більш точного (локального внесення), забезпечивши при цьому приріст урожайності [23–24]. Рідкі комплексні добрива (NPK у розчині) широко використовуються у фертигації

та тепличному вирощуванні завдяки можливості рівномірного живлення на всіх стадіях росту, хоча потребують ретельного контролю концентрації [25–26].

Суспензійні форми добрив (suspension fertilizers) мають високу концентрацію поживних речовин і дозволяють вносити великі дози за один прохід техніки, однак вимагають спеціалізованого обладнання [10].

В Україні за останні роки спостерігається поступове зростання інтересу до рідких форм мінеральних добрив як одного з елементів сучасних технологій живлення рослин. Розчини на основі аміачної води та карбамід-аміачних сумішей, використовуються для оперативного підживлення вегетуючих рослин завдяки високій доступності поживних речовин та можливості точного дозування під потреби культури. На відміну від традиційних гранульованих форм, рідкі добрива забезпечують мобільність та адаптацію до технічних платформ сучасного господарства [26–27].

1.3 Аналіз сучасних технологій та обладнання для внесення рідких мінеральних добрив

У виробничій практиці застосовують кілька технологічних схем внесення рідких добрив, які відрізняються за конструкцією обладнання та способом подачі робочого розчину [28–33] (рис. 1.5).

Важливе місце займають агрегати, які забезпечують одночасний обробіток ґрунту і внесення рідких добрив (рис. 1.5, *І*). У цьому випадку робочий розчин подається у розпушений шар ґрунту на глибину 10–15 см, що створює максимально сприятливі умови для засвоєння поживних речовин. Така технологія відзначається високою агрономічною ефективністю, оскільки поєднує декілька операцій за один прохід та знижує ущільнення ґрунту [30, 32, 34–37].

Сучасні *культиватори* оснащуються спеціальними система для внесення рідких мінеральних добрив. На рамі агрегата розміщується ємність для добрива, магістральні трубопроводи та дозувально-розподільна система. Подача робочої рідини здійснюється відцентровим насосом, який приводиться в дію від гідравлічної

системи трактора. Робоча рідина подається під тиском безпосередньо в оброблений шар ґрунту на глибину 8–12 см [34].

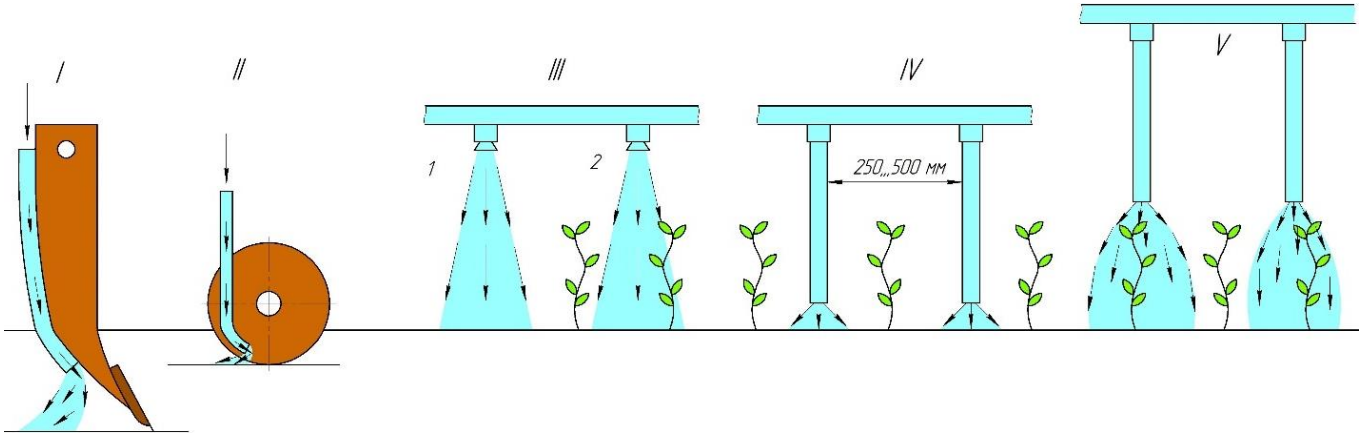


Рисунок 1.5 – Технологічні схеми внесення рідких мінеральних добрив: *I* – культиваторами під час основного та міжрядного обробітку ґрунту; *II* – сівалками при посіві зернових та просапних культур; *III* – обприскувачами з різними типами розпилювачів (розбризкувачів): *1* – на поверхню ґрунту; *2* – на рослину; *IV* – обприскувачами з подовжувачами до поверхні ґрунту; *V* – обприскувачами з подовжувачами до рослин

В Україні провідними виробниками культиваторів з системами для внесення рідких мінеральних добрив є ПрАТ «Богуславська сільгосптехніка» [38], ТМ «СХІД» [39], ТМ «DEMETRA» [40] та «Elvorti» [41].

Серед закордонних виробників можна відмітити наступні рішення компанії Evers [42] – серія дискових інжекторних агрегатів (Toric, Quadro); Garant Kotte [43] випускає причіпні та начіпні інжектори «slurry cultivators». Модельний ряд представлений значним вибором машин по ширині захвату, які забезпечують внесення на глибину 5–12 см. Культиватори можуть бути використані як при суцільному обробітку так і за технології Strip-Till.

Wienhoff [44] пропонує «injection technology» – модулі інжекторів, що інтегруються в культиватори або дискові агрегати (партнерства з Horsch, Evers та ін.). Інжектори цих виробників призначені для прямого внесення рідких розчинів у ґрунт під час обробітку.

Kverneland розробила систему iXtra LiFe [45] для подачі рідких добрив на широкий спектр ґрунтообробної або посівної техінки. Вона сумісна ISOBUS, що дає можливість взаємодії з іншими виробниками техніки.

Поряд із перевагами підґрунтове внесення рідких мінеральних добрив культиваторами характеризується низкою технологічних недоліків. Основними з них є нестабільність глибини загортання та нерівномірність розподілу добрив, що зумовлено змінним опором ґрунту, налипанням вологого ґрунту на робочі органи та коливанням тиску в гідросистемі подачі робочої рідини. Це призводить до відхилень фактичної дози внесення, підвищених енергозатрат, особливо в умовах важких і перезволожених ґрунтів.

Окрему групу становлять системи *внесення рідких добрив під час сівби* (рис. 1.5, *II*). Синхронізація висіву та подачі рідкого добрива забезпечує оптимальне розташування поживних елементів у зоні проростання насіння. Цей метод отримав широке застосування у вирощуванні кукурудзи, сої та зернових культур, оскільки сприяє швидкому старту розвитку, підвищенню енергії проростання та економії ресурсів [35, 46–47].

Сучасні конструкції сівалок вирізняються використанням пневматичних або механічних висівних апаратів, систем контролю висіву, електричних приводів секцій та бункерів збільшеної місткості [48]. Для підвищення технологічної ефективності багато моделей обладнуються комплексами для одночасного внесення стартових добрив у рідкій формі. Застосування таких систем забезпечує точне локальне живлення рослин у зоні рядка та сприяє підвищенню польової схожості насіння [49].

У світі та в Україні існує кілька відомих виробників сівалок, які мають в своїй лінійці моделі з заводською або сертифікованою системою для внесення рідких мінеральних добрив [41, 50–54].

Незважаючи на агрономічні переваги внесення рідких стартових добрив у рядок під час сівби, існуюча технологія характеризується значною варіабельністю фактичної норми внесення та нерівномірністю розподілу добрив між рядками, що пов’язано з технічними обмеженнями систем подачі рідини та їх чутливістю до зміни швидкості агрегату, тиску в магістралях і точності контролю.

Ще одним технічним рішенням є *ін'єктори*, які дозволяють локалізовано доставляти рідку форму поживних речовин в прикореневу зону на задану глибину із мінімальним порушенням структури ґрунту.

Серед найпоширеніших конструктивних рішень на світовому ринку – «spoked-wheel» (колісні) ін'єктори. Вони формують вузьку щілину та вводять рідке добриво через порожнисті шпильки коліс у розпушений шар ґрунту. Такий спосіб забезпечує захист від випаровування і мінімальне поверхневе забруднення, де важлива точність підґрунтового внесення [55–56].

Одним із найбільш поширених та технічно гнучких способів є *поверхневе внесення за допомогою обприскувачів* з різними типами розпилювачів (розбризкувачів) (рис. 1.5, *III*). Такий підхід дає змогу проводити позакореневе підживлення та оперативно реагувати на потреби рослин у пізні фази вегетації. Ефективність цього способу підтверджена численними експериментальними дослідженнями, які демонструють швидке надходження азоту через листкову поверхню за умов оптимальної концентрації робочої рідини [34, 57–58].

Інша схема передбачає використання шлангів або рукавів, що опускаються майже до поверхні ґрунту або поверхні рослин (рис. 1.5, *IV, V*). Її основна перевага – зниження втрат азоту через випаровування, що є критично важливим при роботі у регіонах з високими температурами або низькою вологістю. Локалізація рідини ближче до кореневої чи листової системи підвищує коефіцієнт використання азоту [32, 34–35].

Порівняно з іншими способами внесення – сівалками, культиваторами чи ін'єкторами – обприскувачі забезпечують ширший діапазон норм внесення, більш рівномірний розподіл робочої рідини та універсальність використання у різні фази розвитку культури [59–62]. Саме універсальність є ключовою перевагою: той самий агрегат може використовуватися для поверхневого внесення до сівби, для міжрядного підживлення, а також для позакореневого внесення на пізніших етапах вегетації, що знижує потребу у додатковій техніці.

Ефективність внесення рідких добрив обприскувачами зумовлена також здатністю цих машин формувати цільові параметри краплі та факела розпилення.

Використання спеціалізованих пристроїв (розбризкувачів) для рідких мінеральних добрив: щілинних, інжекторних, дефлекторних або багатоструминних, дозволяє забезпечувати небхідний розмір краплин залежно від цільового внесення [63–67]. На відміну від культиваторів чи ін'єкторів, обприскувачі можуть працювати на значно вищих швидкостях [68–69] (до 15–20 км/год), що підвищує продуктивність агрегату та дозволяє виконувати підживлення у вузькі технологічні вікна, особливо у період ранньовесняних підживлень.

Ще однією перевагою обприскувачів є здатність забезпечувати точне дозування добрив завдяки системам автоматичного регулювання норми подачі, контролю секцій та рівняння тиску. Сучасні машини оснащуються комп'ютерами з підтримкою ISOBUS, модулями VRA-внесення та GPS-контролем [70–72], що дозволяє адаптувати норму добрива відповідно до карт урожайності або карти забезпеченості ґрунту елементами живлення. У випадку культиваторів такі системи зустрічаються значно рідше, а ефективність ін'єкторних агрегатів істотно залежить від стану ґрунту та мікрорел'єфу його поверхні.

З точки зору технологічної гнучкості обприскувачі дозволяють працювати як по стерні, так і по вегетуючих посівах; значна ширина штанги (24–36 м) забезпечує обробку значних площ за короткий час [73–74]. Крім того, можливість швидко змінити тип розпилювача дає змогу застосовувати різні технологічні підходи: струменеве внесення, крупнокраплинне підживлення у фазі кущення або ж дрібнокраплинне внесення у фазі прапорцевого листка.

Основний принцип за яким класифікують *польові штангові обприскувачі* це тип агрегатування. У відповідності до цього вони бувають: начіпні, причіпні та самохідні (рис. 1.6–1.7) [75–78].

Начіпні моделі мають відносно незначний за об'ємом бак (до 1000 л) та ширину захвату штанги (до 16 м) і застосовуються переважно в невеликих господарствах [76, 79]. Причіпні характеризуються більшою ємністю баків (1500–6000 л) і штангами до 36 м [76, 80]. Самохідні обприскувачі є найпродуктивнішими, за рахунок збільшеного кліренса можуть здійнювати внесення на пізніх етапах вегетації [76, 81].



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.6 – Закордонні обприскувачі:

а – Hardi AEOH 5200; б – Amazone Pantera 4502; в – BERTHOUD Vantage 4300;

г – KUHN Boxer 2000; д – Jacto Advance 3000AM; е – John Deere 550R;

Серед провідних закордонних виробників обприскувачів та обладнання до них, необхідно відмітити: HARDI (Данія) (рис. 1.6, а) [82], AMAZONE (Німеччина) (рис. 1.6, б) [83], BERTHOUD (Франція) (рис 1.6, в) [84], KUHN (Німеччина) (рис. 1.6, в) [85], Jacto (Бразилія) (рис. 1.6, г) [86], John Deere (США) (рис 1.6 д) [87], TECNOMA

(Франція) [88] та інші. Ці виробники пропонують широкий спектр моделей: начіпні, причіпні s самохідні обприскувачі із з великим вибором базових параметрів (ширина захвату, місткість бака), що дає змогу обирати машину під конкретні умови господарства та культуру [89].



а) б) в) г) д) е)

Рисунок 1.7 – Обприскувачі вітчизняного виробництва:
а – ЛьвівАгроМашПроект ОПШ-3524/3521; б – Elvorti Tetis 18; в – Богуславська сільгосптехніка Кронос-2500-22; г – Аякс Агро ОП-22; АгроМОДУЛЬ ОМ-2720; е – Білоцерківмаз Sokil-24

Український ринок представлений виробниками й дилерами, які постачають обприскувачі або адаптують імпортні моделі під місцеві агрокліматичні умови. Серед виробників можна відмітити: ЛьвівАгроМашПроект (виробляє лінійку причіпних, самохідних обприскувачів та обладнання до них) (рис. 1.7, а) [90], Ельворті виробляє лінійку причіпних обприскувачів Tetis (рис. 1.7, б) [91], Богуславська сільгосптехніка (рис. 1.7, в) [38], Аякс Агро (рис. 1.7, г) [92], АгроМОДУЛЬ (рис. 1.7, д) [93], Білоцерківмаз (рис. 1.7, е) [94].

До переваг вітчизняних виробників можна віднести – доступність (значно нижча цінова категорія порівняно з закордонними аналогами), адаптація до місцевих умов, можливість обслуговування у межах країни, а також відносна простота конструкції.

1.4 Класифікація та принципи роботи розпилювачів для внесення РМД

Розпилювачі, що застосовуються для внесення рідких мінеральних добрив, є ключовим елементом обприскувача і визначають розмір крапель, рівномірність розподілу по цільовій поверхні та форму факела [32, 65, 76, 95]. Правильний підбір розпилювача забезпечує мінімізацію втрат діючої речовини, зменшення зносу (дрейфу) та оптимальне проникнення розчину в ґрунт або рослинний покрив [96, 97]. За сучасною класифікацією розпилювачі для внесення РМД поділяють за типом конструкції, розміром крапель, формою факела [95].

Для внесення РМД найчастіше використовують наступні типи розпилювачів: *щілинні* (плоскоструменеві, flat-fan), *інжекторні* (повітряноіндукційні, air-induction), *дефлекторні* (flood), *струменеві* (stream) та їх модифікації [95, 98, 99, 100].

Світовий ринок виробництва розпилювачів представлений компаніями з багаторічним досвідом [98]: TeeJet Technologies (США) [101], Lechler GmbH (Німеччина) [102], Hardi International (Данія) [82], Hypro (США) [103], Albuz (Франція) [104], Agrotop GmbH (Німеччина) [105], «Львівагромашпроект» (Україна) [90], АгроМОДУЛЬ (Україна) [93].

Щілинні розпилювачі (standard flat-fan) (рис. 1.8, а) формують вузький плоский факел із дрібними або середніми краплями, залежно від тиску (рис. 1.8, б), що забезпечує рівномірне покриття цільвої поверхні і традиційно використовуються для позакореневого підживлення розчинами низької концентрації [98, 106].

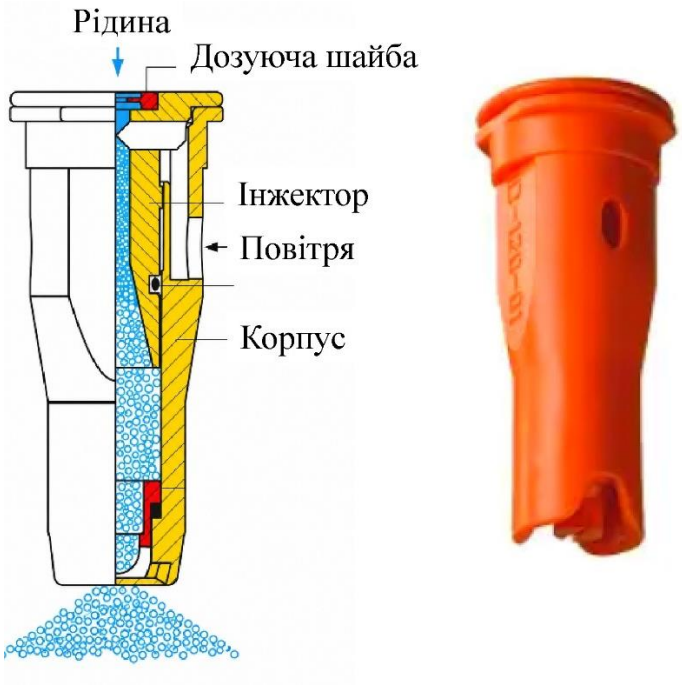


а б

Рисунок 1.8 – Щілинний розпилювач TeeJet XR 11008-VP [101]:
а – загальний вид; б – вид факелу розпилу

На ринку представлено широкий типорозмірний діапазон розпилювачів. При цьому слід звернути уваги на розмір краплин, які утворюються розпилювачем. Краплини з розміром 50–150 мкм будуть знесені вітром, краплини з розміром 800–900 мкм можуть спричиняти опіки. Оптимальний розмір краплин для внесення РМД вважається 340–700 мкм [107–108]. Основні характеристики щілинних розпилювачів провідних світових виробників у відповідності до вимог розміру краплин наведені в додатку А.

Інжекторні розпилювачі (air-induction) (рис. 1.9) працюють за принципом змішування рідини з повітрям у камері інжекції: через бічні отвори засмоктується повітря, яке змішується з розчином і формує великі порожнисті краплі, які будуть більшого розміру, ніж у інших розпилювачів, і саме це дає зниження знесення рідини вітром [32, 109–110].



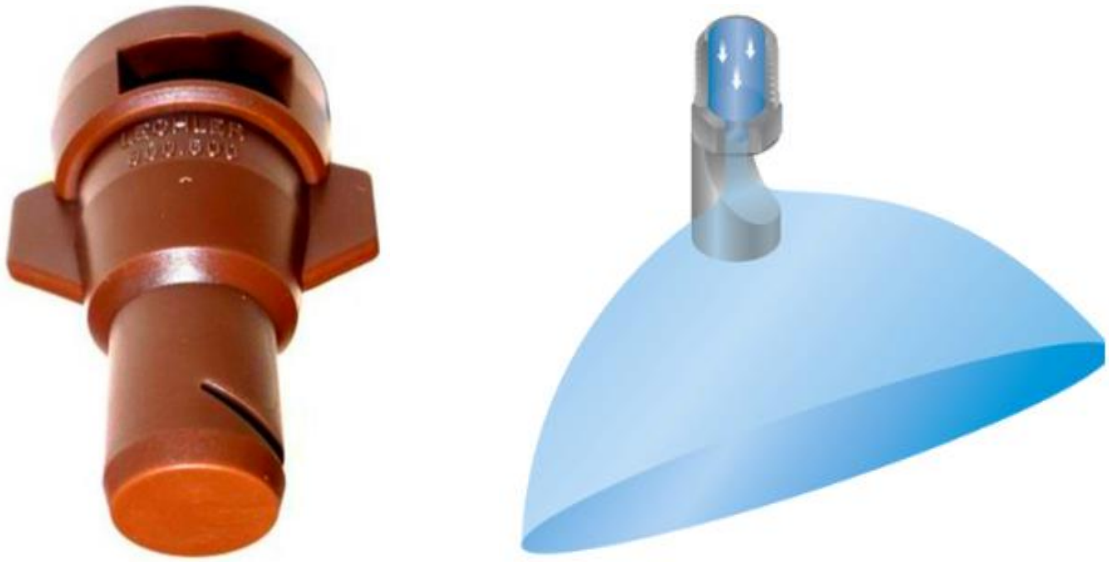
а б

Рисунок 1.9 – Інжекторний розпилювач:
а – принцип роботи; б – загальний вид Lechler ID-120-04 [101]

Інжекторні розпилювачі працюють за підвищеного тиску, тому їх ефективне функціонування забезпечується переважно в інтервалі 0,2–0,8 МПа, що висуває додаткові вимоги до параметрів обприскувача. Використання таких розпилювачів є доцільним під час внесення, наприкалад, КАС у суміші з гербіцидами, особливо за умов підвищених температур та наявності поривів вітру до 8 м/с [32, 111–112].

У додатку А подано узагальнені технічні параметри інжекторних розпилювачів, що випускаються провідними світовими виробниками.

Дефлекторний розпилювач (рис. 1.10) представляє собою циліндричний корпус з каліброваним каналом, по якому під тиском рухається робоча рідина. Потік виходить із каналу й ударяє по профільованій перегородці-дефлектору, яка спрямовує рідину під значним кутом 70-80° від початкової осі та перетворює її в тонку, віялоподібну плоску плівку. За рахунок розтягування і зменшення товщини ця плівка поступово фрагментується на краплини розміром 500-1500 мкм. Геометрія та профіль дефлектора визначають кут розкриття факела і його дисперсний склад (табл. 1.1) [32, 95, 98, 99, 113].

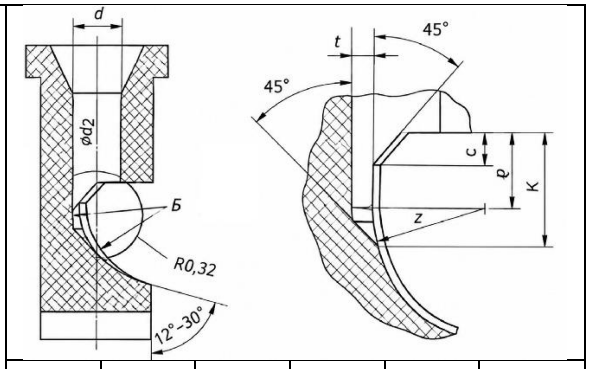


а б

Рисунок 1.10 – Дефлекторний розпилювач:

а – загальний вид; б – принцип роботи

Таблиця 1.1 – Основні характеристики та розміри дефлекторного розпилювача

Розпилювач	Шифр сопла	Витрата при тиску 0,3 МПа, л/хв	Кут розкриття факелу, град						
				d, мм	C, мм	K, мм	l, мм	r, мм	t, мм
ПОТ 27.001-01	РД-1,6	2,60	175°	1,6	0,63	2,4	1,5	1,5	0,2
ПОТ 27.001-02	РД-2,0	3,15	175°	2,0	0,80	3,0	2,5	4,0	0,35
ПОТ 27.001-05	РД-4,0	13,51	175°	4,0	1,60	4,0	3,5	6,5	0,60

На сучасному етапі дефлекторні розпилювачі визнані одним із найдоцільніших рішень для внесення концентрованих робочих розчинів по вегетуючих рослинах, особливо на початкових фазах росту до початку трубкування [32, 114].

Їх конструкція і принцип дії сприяють формуванню переважно великих крапель, що забезпечують рівномірне покриття цільової поверхні та зменшують негативний вплив дрейфу в порівнянні з розпилювачами, що утворюють дрібні краплини. Завдяки більш горизонтальній траєкторії руху крупних крапель, контакт із рослинами відбувається менш травматично, що значно знижує ризик потенційних опіків рослин при внесенні препаратів. Також конструкція таких розпилювачів робить їх менш схильними до забивання, що покращує експлуатаційну надійність у польових умовах [32, 115–116].

Lechler, TeeJet, Львівагромаш випускають лінійку дефлекторних розпилювачів, основні характеристики яких наведені в додатку А.

Принцип дії *струменевих розпилювачів* (рис. 1.11) базується на перетворенні потоку рідини під тиском через калібровані отвори в кілька (3–5–7) стабільних струменів замість широкого туманного факела. Розмір та розподіл крапель у факелі визначаються величиною робочого тиску та геометрією отворів. Збільшення розміру крапель зазвичай зменшує схильність до дрейфу, що сприяє точнішому внесенню робочого розчину у задану зону обробки [32, 117].

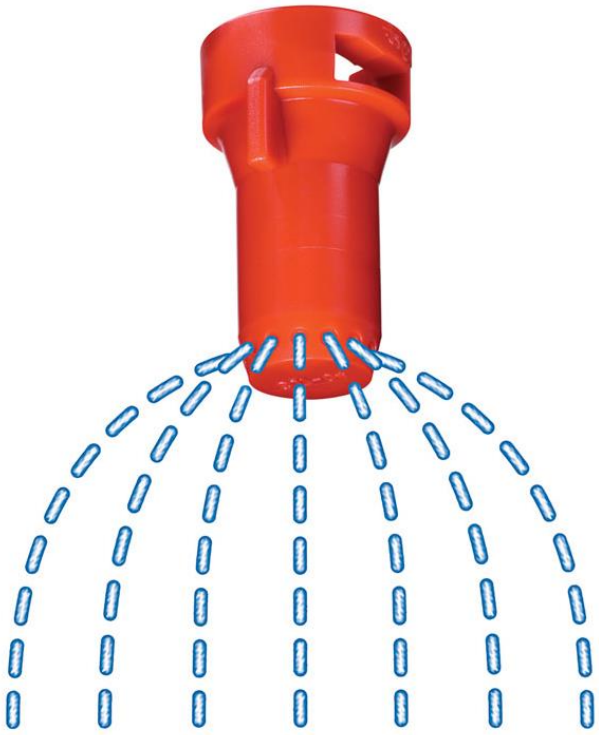


Рисунок 1.11 – Схема роботи струменевого розпилювача

Струменеві розпилювачі найчастіше застосовують для внесення рідких розчинів безпосередньо в ґрунт під час передпосівного обробітку або в перші кілька днів після посіву, коли агротехнічні заходи мають забезпечити оптимальні умови для проростання насіння [32].

Узагальнені технічні показники розпилювачів наведено в додатку А.

У проміжок від початку трубкування до настання фази молочної стиглості зернових культур, доцільним є внесення рідких добрив безпосередньо у прикореневу зону з використанням розливних шлангів типу 5S/5SL (рис. 1.12, а) [102], Y-DROP [118].

Ще одне рішення це аплікатор Dropleg (рис. 1.12 б), який уявляє собою гнучку конструкцію з пластикових підвісних елементів, на нижній частині яких залежно від технологічної операції монтуються відповідні типи розпилювачів, переважно двофакельні для підлисткової обробки.



а б

Рисунок 1.12 – Аплікатори для подачі добрив в прикореневу зону:
а – Lechler 5S/5SL; б – Dropleg

Під час руху обприскувача трубки Dropleg вільно коливаються між рядками культур, забезпечуючи стабільне розташування розпилювачів у зоні нижнього ярусу рослин. Конфігурація системи дозволяє безперешкодно адаптувати її під різні схеми міжрядь, що робить обладнання універсальним для широкого спектра культур [32, 34].

Такі рішення подачі робочої рідини без контакту з листковою поверхнею, практично усувають ризик виникнення хімічних опіків на рослинах. Крім того, локалізація добрив у ґрунті поблизу кореневої системи сприяє їх більш ефективному засвоєнню у період активного росту рослин. Цей підхід особливо результативний при підживленні просапних культур, оскільки забезпечує точніше внесення поживних речовин та зменшує втрати елементів живлення, пов’язані з поверхневим розпиленням [32, 119–121].

1.5 Огляд експериментальних та аналітичних досліджень розпилювачів

Основна увага досліджень зосереджена на формуванні спектра крапель, *рівномірності розподілу робочої рідини*, *зменшенні втрат від знесення (дрейфу)*, а також на впливі конструктивних і режимних параметрів розпилювачів на *ефективність внесення*.

У працях [65, 122] встановлено, що тип розпилювача та його конструктивні особливості істотно впливають на розмір крапель і характер факела розпилу.

Експериментально доведено, що інжекторні та щілинні розпилювачі з повітряною індукцією формують більший середньооб’ємний діаметр крапель (VMD) [111] (рис. 1.13), що сприяє суттєвому зниженню дрейфу порівняно зі стандартними гідравлічними розпилювачами.

Результати досліджень [112, 123–125], свідчать, що тиск робочої рідини та тип розпилювача є визначальними факторами, які істотно впливають на інтенсивність знесення краплин повітряними потоками. Зі збільшенням тиску формується дрібнодисперсний факел розпилу, що підвищує ймовірність знесення робочої рідини вітром.

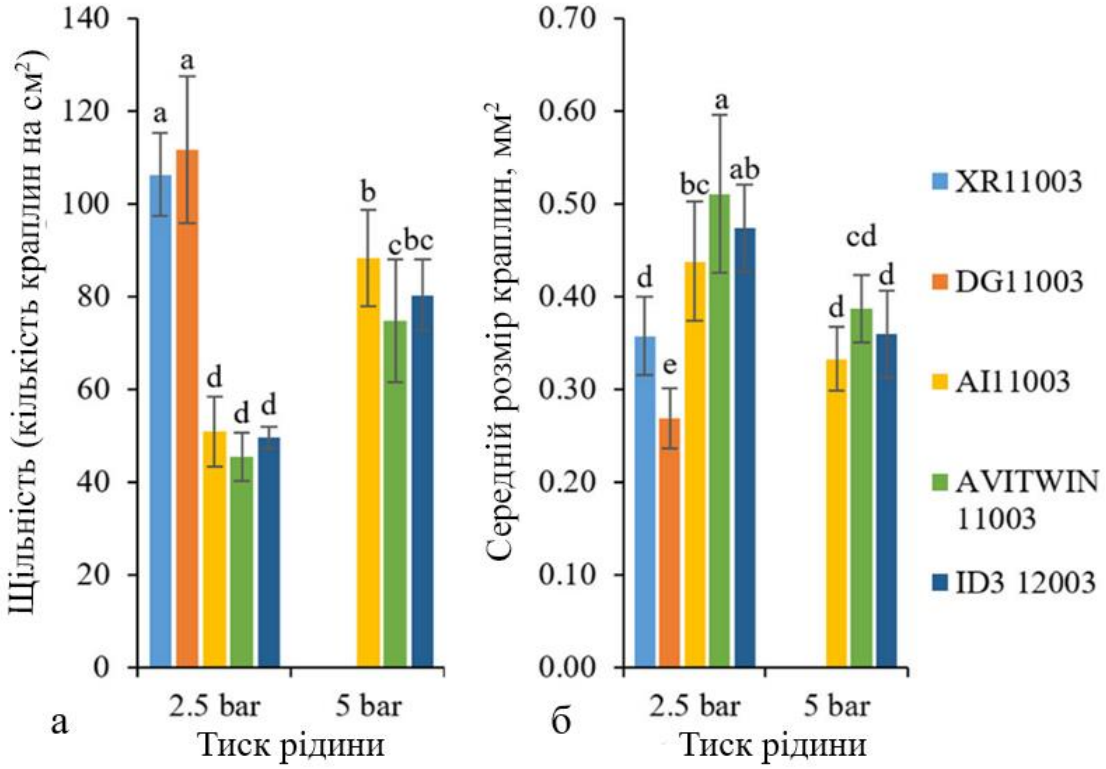


Рисунок 1.13 – Залежність щільності (а) та середнього розміру (б) краплин від типу розпилювача та тиску рідини [111]

Таблиця 1.2 – Залежність дрейфу краплин від тиску робочої рідини та типу розпилювача [112]

Розпилювач	Дрейф краплин, %		
	0,2 МПа	0,3 МПа	0,4 МПа
ST110-03	43,3	0,0	-50,0
LU120-03	52,8	2,6	55,7
IDK120-03	90,4	80,1	61,2
IDKT120-03	85,2	81,6	69,6
ST110-05	64,8	28,7	-8,6
LU120-05	55,3	35,2	-16,0
IDK120-05	87,1	85,4	80,6
IDKT120-05	82,1	71,0	74,4

Дані табл. 1.2 свідчать про те, що інжекторні розпилювачі, порівняно зі щілинними, забезпечують формування краплин більшого середнього діаметра та меншої частки дрібної фракції, унаслідок чого характеризуються кращими

показниками протидії вітровому знесенню і підвищеною стабільністю осадження робочої рідини на цільовій поверхні.

Подібні результати отримано і в подальших дослідженнях, де показано, що підвищення робочого тиску та зміна формуляції робочого розчину призводять до зменшення розміру крапель і збільшення потенціалу знесення [126–128].

У дослідженні [129] встановлено, що вплив тиску робочої рідини та діаметра розпилювача суттєво впливає на дисперсний склад краплин і показники якості розпилення. Збільшення діаметра відцентрового розпилювача супроводжується формуванням крапель більшого середнього розміру, що зумовлює зменшення дрейфу та підвищення ефективності осадження робочої рідини. Отримані результати підтверджують необхідність оптимального поєднання тиску розпилення та діаметра розпилювача для забезпечення високої якості обробки й мінімізації дрейфу (рис. 1.14).

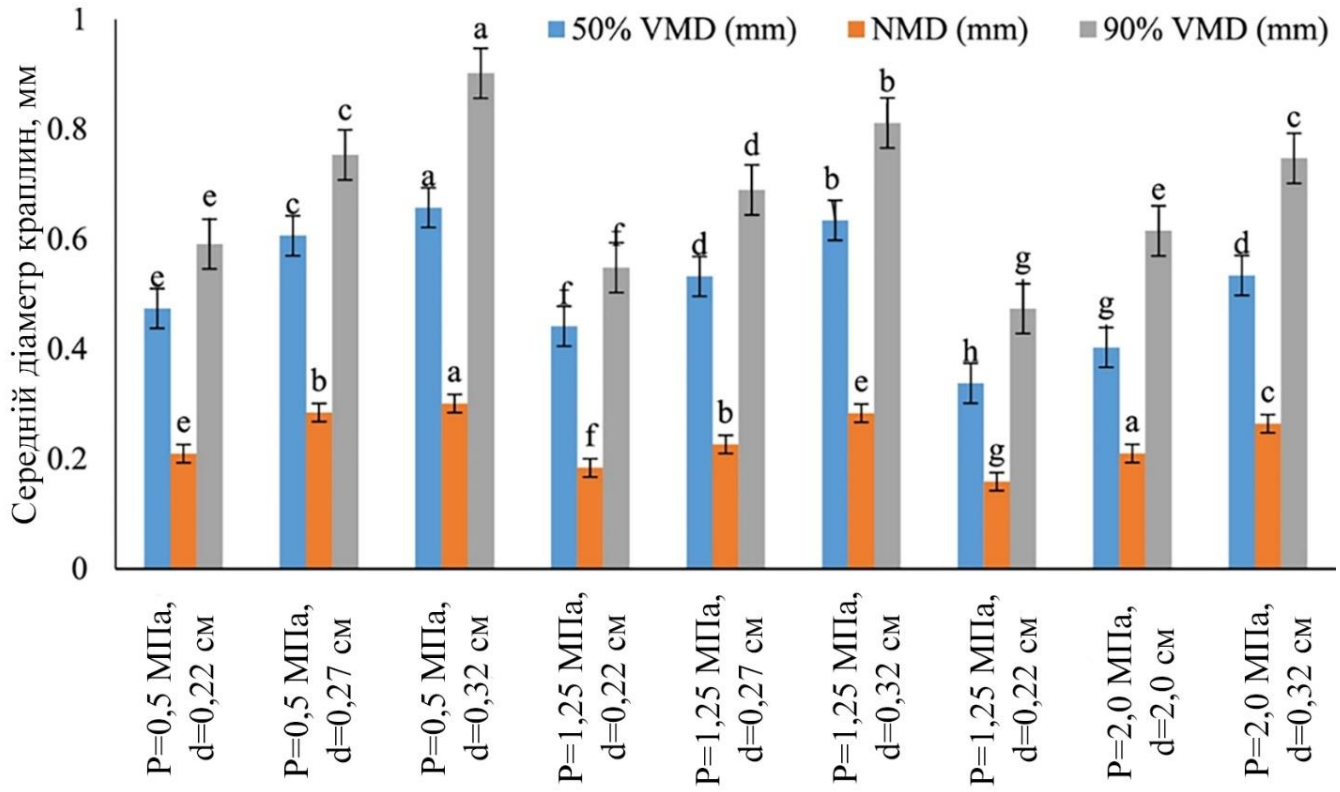
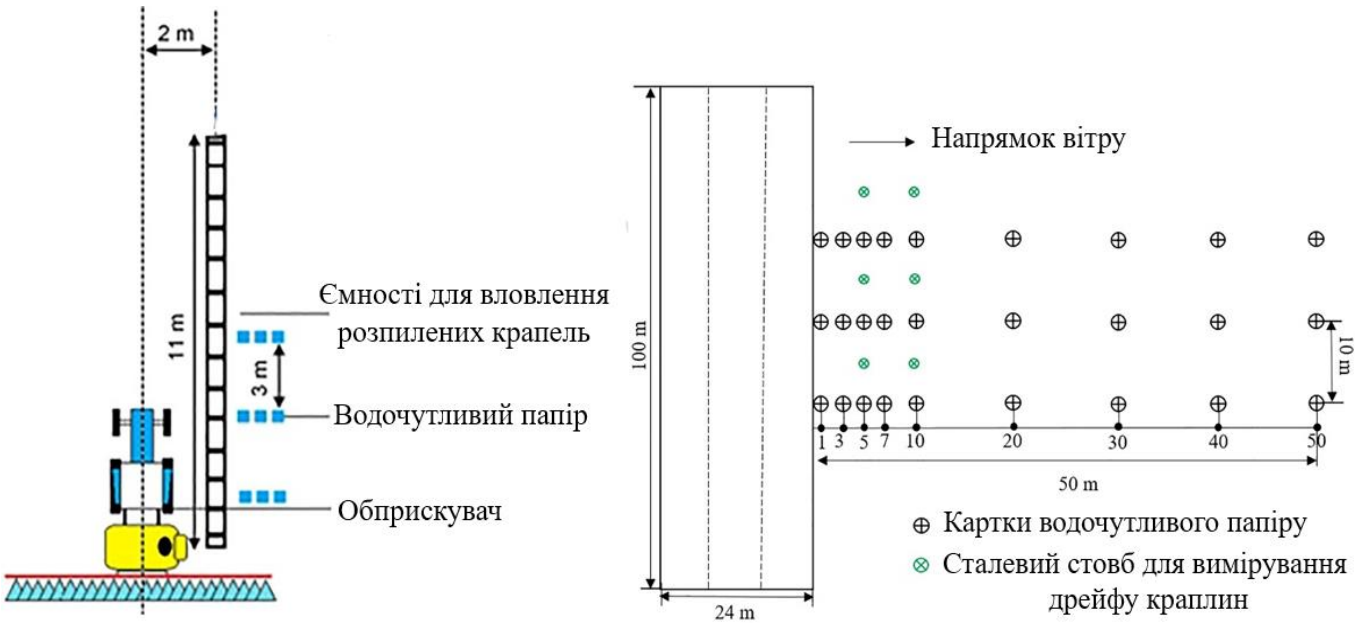


Рисунок 1.14 – Вплив тиску рідини та діаметра розпилювача на розмір краплин [128]

Значний масив робіт присвячений аналізу впливу робочих параметрів розпилення на якість нанесення рідини. У дослідженнях встановлено залежність між

швидкістю витікання струменя, розміром крапель та їх кінематичними характеристиками, що безпосередньо впливає на проникнення робочої рідини в рослинний покрив і рівномірність покриття поверхні [65, 130–132]. Автори наголошують, що оптимізація параметрів розпилення є необхідною умовою ефективного застосування агрохімікатів.

Авторами виконано порівняльні лабораторно-польові дослідження ефективності щілинних та інжекторних розпилювачів щодо зменшення дрейфу крапель. Запропоновано комплексну методику оцінювання перенесення робочої рідини, що поєднує стендові та польові випробування. Розроблено експериментальну установку для визначення потенціалу знесення, у якій як реєструвальні елементи використано водочутливий папір, розташований уздовж траєкторії осадження факела розпилу. Такий підхід забезпечує кількісну оцінку дисперсного складу розпилу та дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів насадки й робочого тиску на формування дрібнодисперсної фракції, найбільш схильної до аеродинамічного перенесення (рис. 1.15) [133].



а б

Рисунок 1.15 – Стенд (а) та схема (б) проведення польових досліджень розпилювачів [133]

Окрему групу становлять дослідження, присвячені зниженню дрейфу та екологічним аспектам внесення. У роботах [134–135] наголошується, що застосування розпилювачів із повітряною індукцією, зниження робочого тиску та використання спеціальних ад'ювантів дозволяють зменшити втрати робочої рідини на 30-70 % залежно від умов експерименту. Це має особливе значення для внесення РМД, оскільки втрати азотних добрив призводять не лише до економічних збитків, але й до негативного впливу на довкілля [136].

У дослідженні [137] обґрунтовано математичну модель розподілу крапель за розмірами, згідно з якою дисперсний склад факела розпилу описується експоненційною залежністю. Експериментальні дослідження, проведені з використанням конусних розпилювачів. Встановлено наявність дуже тісної оберненої кореляції між робочим тиском і діаметром крапель, що свідчить про визначальний вплив тиску, типу та типорозміру розпилювача на формування дисперсного складу розпилу.

У сучасних дослідженнях дедалі ширше застосовуються аналітичні та чисельні методи. У роботі [138] здійснено чисельне моделювання потенціалу дрейфу щілинних розпилювачів з урахуванням впливу горизонтальної складової повітряного потоку на дисперсний склад факела розпилу та показники осадження (рис. 1.16).

Встановлено, що розмір крапель є визначальним параметром, який одночасно обумовлює інтенсивність осадження та ступінь їх аеродинамічного перенесення. За незмінної норми внесення робочої рідини зменшення середнього діаметра крапель супроводжується експоненційним зростанням їх кількості, що підвищує рівномірність покриття поверхні та покращує проникнення препарату в рослинний покрив. Водночас надмірне зменшення діаметра крапель призводить до підвищення їх чутливості до дії повітряних потоків, інтенсифікації процесів випаровування та збільшення втрат препарату внаслідок дрейфу під час транспортування до цільового об'єкта.

Використання чисельного моделювання дозволяє прогнозувати процес формування факела розпилу та обґрунтовувати раціональні конструктивно-технологічні рішення ще на етапі проєктування розпилювальних пристроїв.

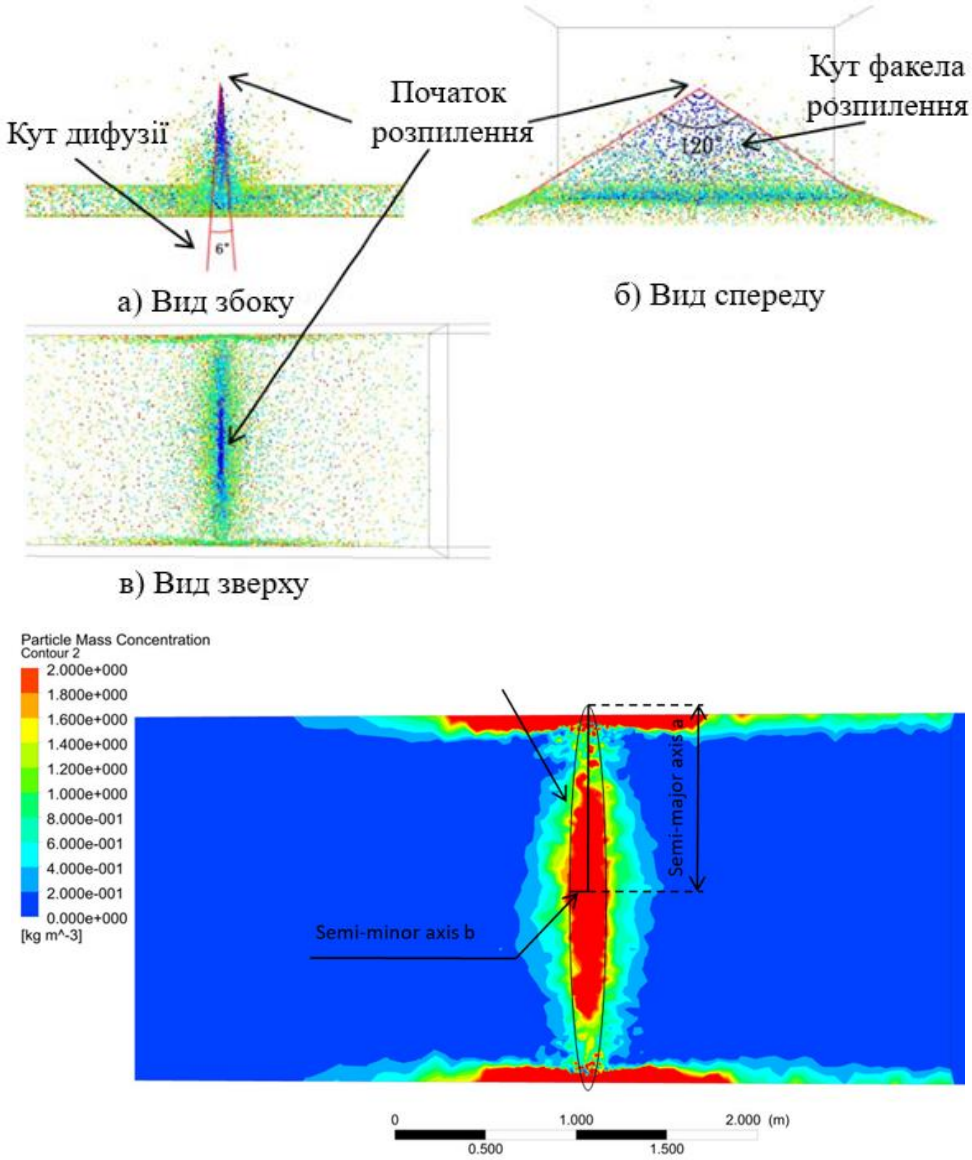
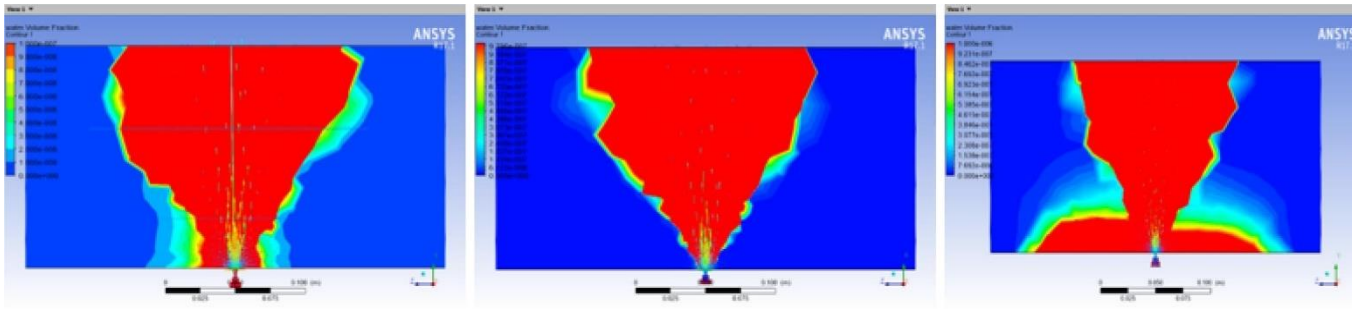


Рисунок 1.16 – Чисельне моделювання процесу розпилення щілинними розпилювачами [137]

У дослідженні [139] розглянуто вплив робочого тиску та конструкції розпилювача на характеристики формування факела розпилення. Експериментальні випробування та чисельне CFD моделювання проведено для щілинних розпилювачів при тиску 0,2–0,4 МПа. Встановлено, що збільшення тиску призводить до зростання кута факела та витрати рідини, а також суттєво впливає на розподіл крапель у факелі. Найбільш рівномірний розподіл частинок серед стандартних розпилювачів забезпечує модель 110-03 (рис. 1.17).



а б в

Рисунок 1.17 – Чисельне моделювання розподілу рідини при тиску 0,3 МПа [139]:
а – TeeJet 110-02; б – TeeJet 110-03; в – TeeJet 110-04.

Авторами [140] запропоновано метод візуалізації та аналізу роботи розпилювачів на основі цифрової голографії з використанням алгоритмів машинного навчання. Метод цифрової inline-голографії у поєднанні з нейронними мережами (U-Net та VGG16) дозволяє визначати просторову структуру крапельного потоку, їх розміри та концентрацію для різних типів розпилювачів (рис. 1.18).

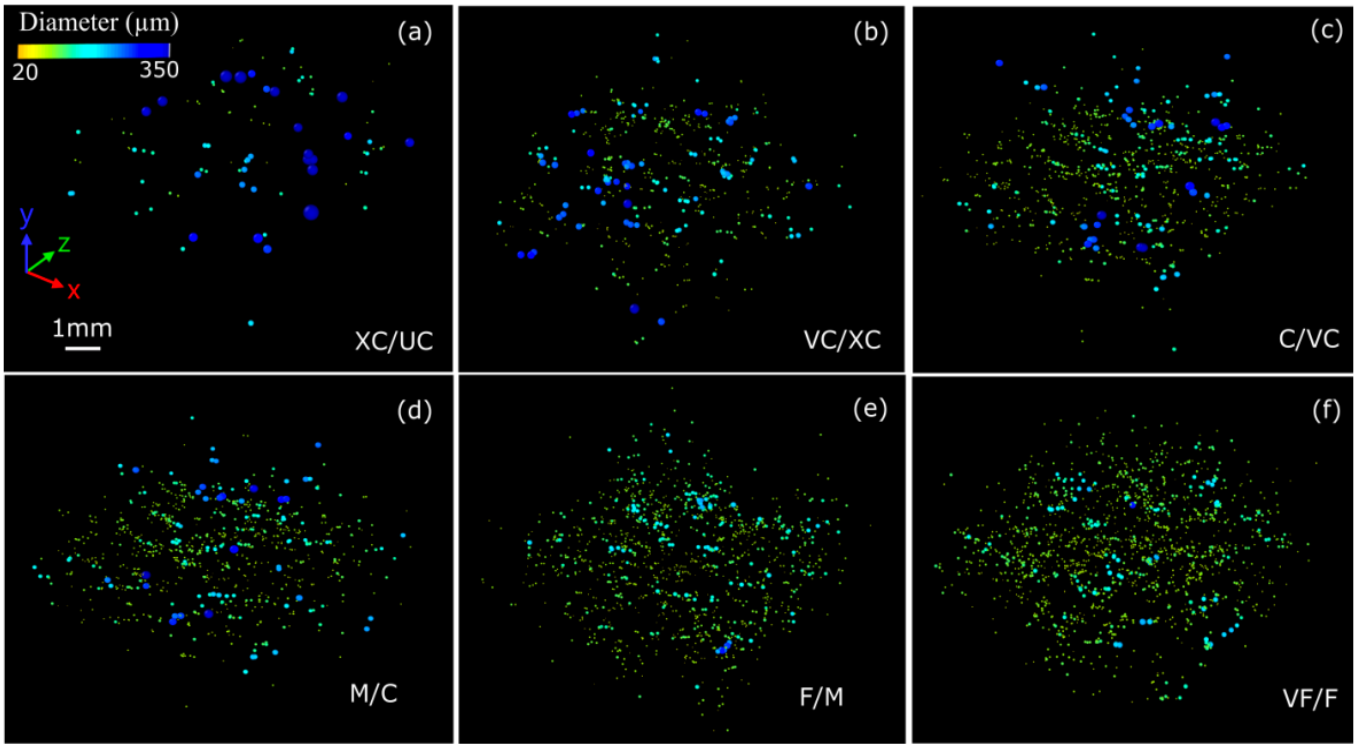


Рисунок 1.18 – 3D-модель розподілу крапель з центральних областей розпилень на відстані 60 см згідно стандарту ASABE [140]:
a – TP6515-SS; b – TP6510-SS; c – TP8008-SS; d – TP11006-SS; e – TP11003-SS; f – TP11001-SS

Запропонований підхід забезпечує точність визначення крапель понад 90 % та значно зменшує кількість помилкових детекцій. Отримані результати дозволяють більш детально досліджувати структуру факела розпилення, масовий та імпульсний потоки крапель, що є важливим для оптимізації процесів внесення засобів захисту рослин.

У роботі [141] досліджено характеристики розпилення емульсій типу «олія-у-воді» під час їх застосування в технологіях обприскування (рис. 1.19).

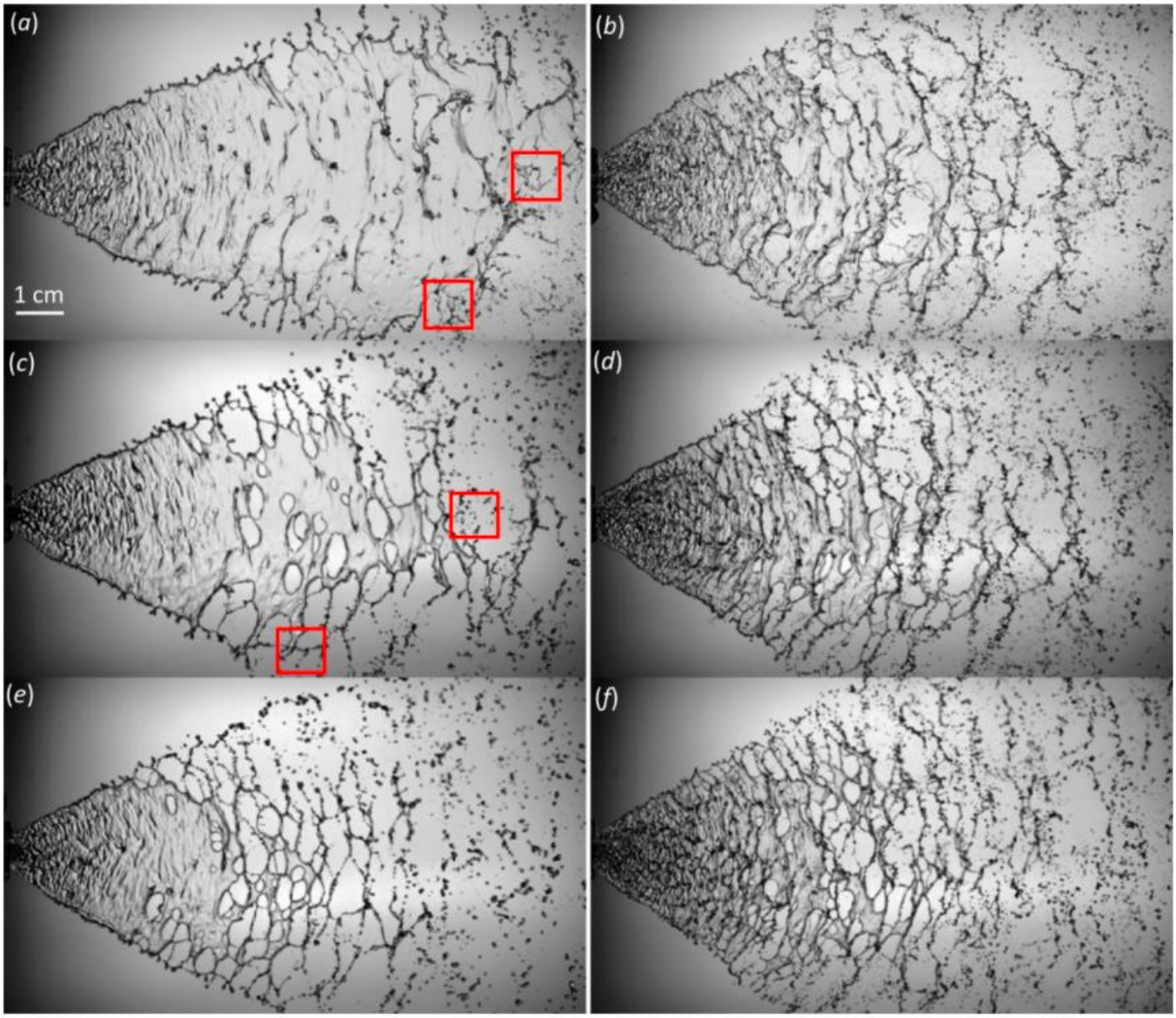


Рисунок 1.19 – Зразки високошвидкісних тіньових зображень розпилень води та емульсії «олія у воді» з щілинного розпилювача TP6515 [141]:
a, c, e – тиск 0,069 МПа; b, d, f – тиск 0,276 МПа; a, b – вода; c, d – 0,1% емульсія «олія у воді»; e, f – 1% емульсія «олія у воді»

Експериментальні дослідження проведено з використанням методу цифрової inline-голографії (DIH), що дозволяє визначати просторовий розподіл крапель, їх розміри, ексцентриситет та швидкість руху в різних зонах факела розпилення. Встановлено, що діаметр крапель у факелі змінюється у широкому діапазоні – від менше ніж 200 мкм до понад 2 мм. Застосування емульсій «олія-у-воді» сприяє зменшенню кількості дрібних крапель та збільшенню швидкості їх руху порівняно з водними розчинами. Також встановлено зменшення ексцентриситету крапель, що пов’язано зі збільшенням товщини рідинної плівки під час руйнування струменя. Отримані результати свідчать, що використання емульсійних робочих рідин може зменшувати дрейф крапель і покращувати проникнення факела розпилення під час сільськогосподарських обробок.

У дослідженні [142] проведено порівняльний аналіз розподілу діаметрів крапель під час розпилення рідини з використанням експериментальних методів візуалізації та чисельного моделювання CFD (рис. 1.20).

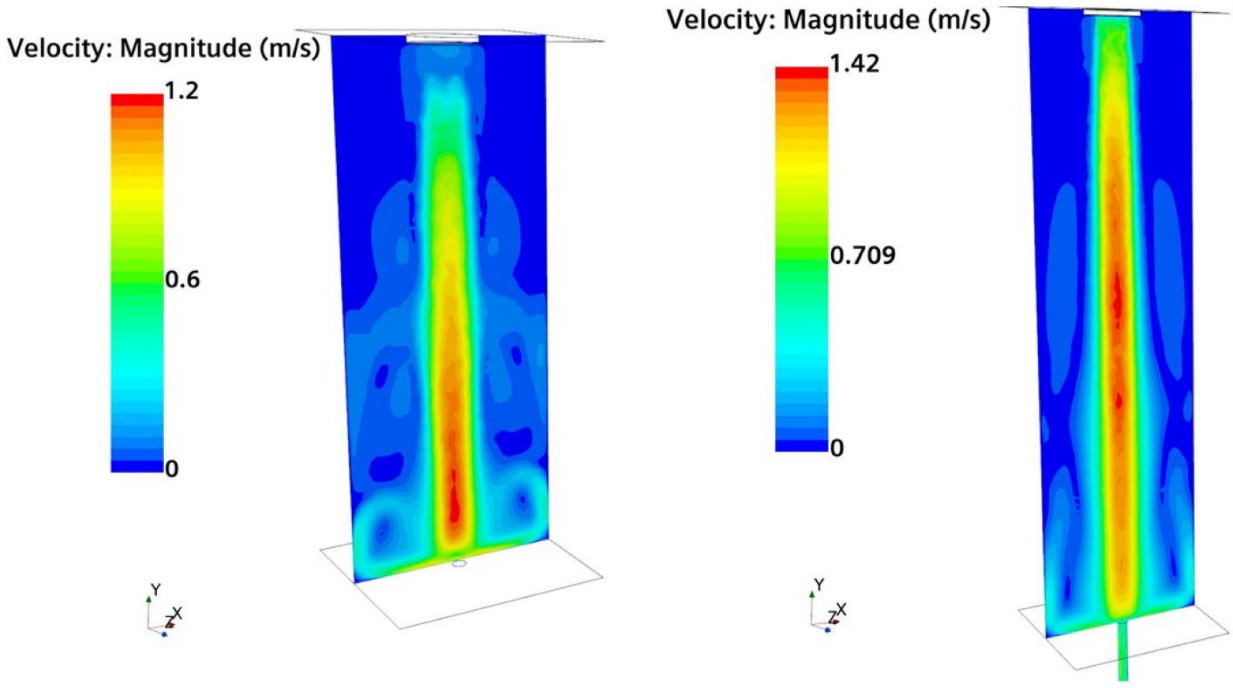


Рисунок 1.20 – Результати чисельного моделювання впливу швидкості повітря на висоту розташування розпилювача [142]

Дослідження спрямоване на вивчення механізмів формування крапель у факелі розпилення та визначення особливостей їх просторового розподілу. Експериментальні дані отримано за допомогою оптичних методів фіксації структури факела, тоді як чисельне моделювання дозволило проаналізувати процеси руйнування рідинного струменя та вторинної атомізації.

У статті [143] досліджено вплив робочих параметрів сільськогосподарських розпилювачів на характеристики формування факела розпилення. Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці-патернаторі для різних типів розпилювачів: порожнистого конуса (hollow cone), трьохструминного (3-way discharge), дефлекторного (flood type) та повного конуса (solid cone). Вивчався вплив робочого тиску (400-1000 кПа) та висоти встановлення розпилювача на витрату рідини, розмір крапель, густину крапель і кут факела (рис. 1.21). Встановлено, що зі збільшенням тиску зростає витрата рідини та кут розпилення, а середній діаметр крапель зменшується. Найбільший розмір крапель спостерігався для трьохструминного розпилювача, тоді як найменший – для розпилювача типу hollow cone.

У наявних дослідженнях авторами запропоновано створення керованої експериментальної системи внутрішнього моделювання з імітацією природного вітру, що дозволяє досліджувати процес осадження крапель у поєднанні з параметрами крони та режимами роботи БПЛА [144–145]. На основі статистичного аналізу чинників і побудови багатофакторної моделі передбачається кількісна оцінка оптимальних параметрів осадження крапель для прийняття технологічних рішень у польових умовах [146–147].

Авторами досліджено [148–149] розмір крапель, який є визначальним фактором ефективності обприскування. Зі збільшенням розміру крапель підвищується швидкість осадження й проникнення крапель у цільову зону та суттєво зменшується дрейф у нецільову зону. Найкращі показники осадження і проникнення отримано для крапель із VMD ≈185 мкм. Використання крапель із VMD <160 мкм призводить до підвищеного дрейфу.

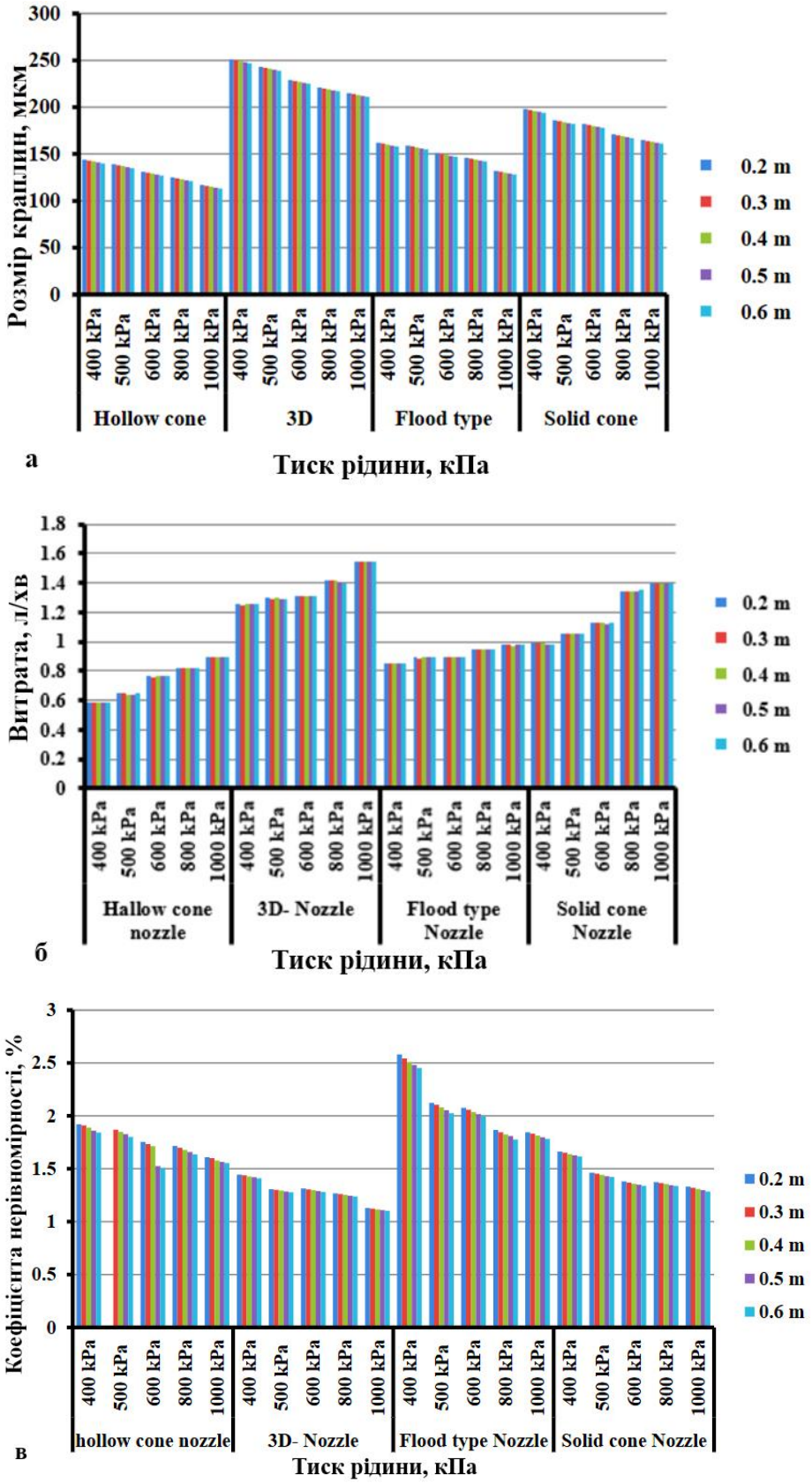


Рисунок 1.21 – Залежність розміру краплин (а), витрати рідини (б), коефіцієнта нерівномірності (в) від типу розпиоювача, тиску рідини та висоти розташування штанги [143]

Проведені польові дослідження [150] дозволяють оцінити ефективність обприскування кавуна залежно від норми внесення та типу розпилювача. Норми внесення впливають на розподіл і осадження крапель на адаксіальній та абаксіальній поверхнях листка, плодах. Норми 12,0–16,0 л/га показали оптимальну рівномірність та покриття рослини (рис. 1.22).

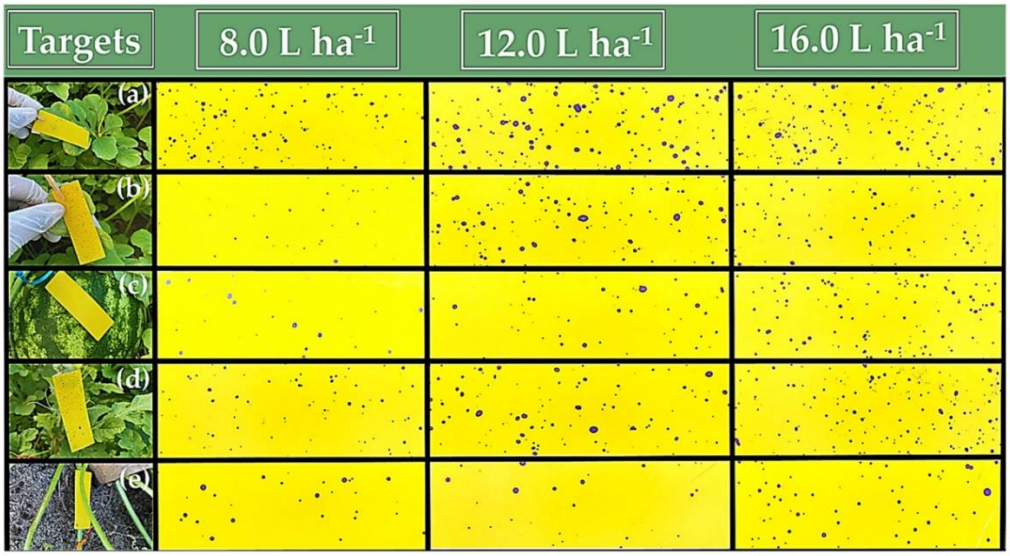


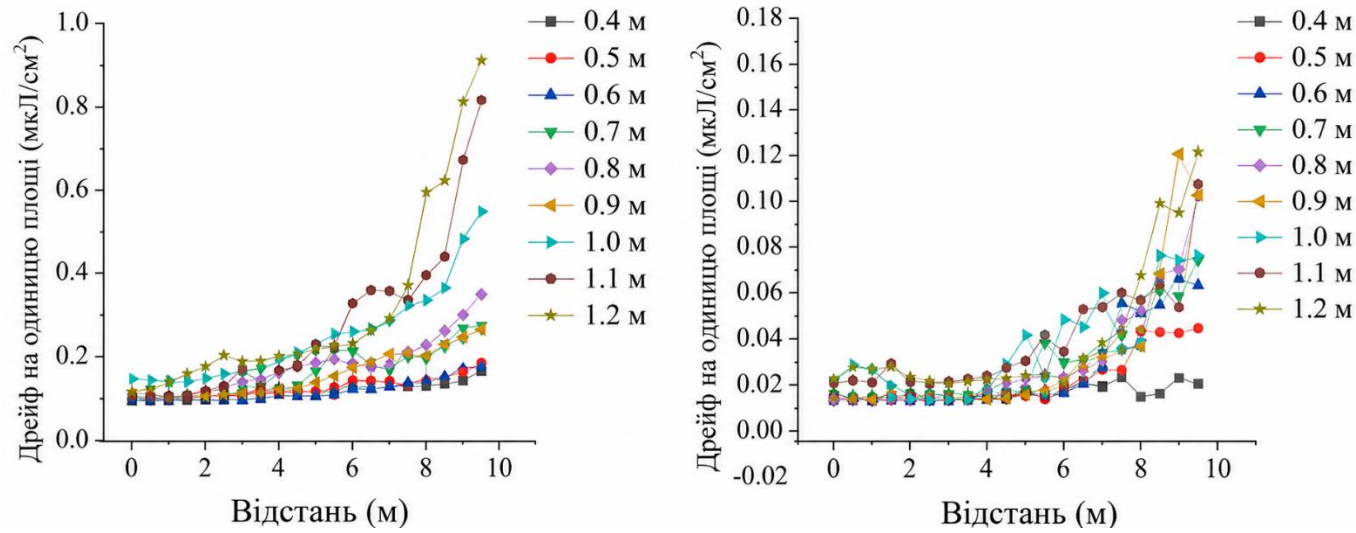
Рисунок 1.22 – Залежність щільності покриття рослин
залежно від норми внесення [150]

Згідно з дослідженнями [151] висота розташування розпилювача суттєво впливає на осадження, рівномірність і дрейф крапель. Польові дослідження показали, що залучення до обприскування БПЛА поступається штанговому обприскувачу, що зумовлено нижчою проникністю та адсорбцією препаратів у середніх і нижніх ярусах.

В роботі [152] було досліджено якість розпилення та потенціал дрейфу залежно від конструкції розпилювача та висоти штанги. Досліджували розпилювачі LI CHENG VP11003 та Teejet XR11003 (рис. 1.23). Потенціал дрейфу для обох розпилювачів зростає зі збільшенням висоти штанги, причому перевищення висоти розташування штанги більше 1,0 м призводить до різкого зростання дрейфу.

У роботах [153–154] експериментально досліджено вплив робочих параметрів обприскувача на коефіцієнт варіації поперечного розподілу робочої рідини для одно, двопотокових і двофакельних розпилювачів. Встановлено, що визначальним

чинником рівномірності внесення є висота розташування штанги, тоді як кут її нахилу має другорядний вплив, а зміна робочого тиску в досліджуваних межах впливає менш суттєво.



а б

Рисунок 1.23 – Залежність дрейфу частинок від висоти розташування штанги та типу розпилювача [152]: а – LI CHENG VP11003; б – Teejet XR11003

Серед українських науковців заслуговує на увагу праця [98], яка присвячена дослідженню підвищення ефективності розпилення пестицидів шляхом удосконалення процесу формування факела. На основі математичного моделювання руху (рис. 1.24) та випаровування краплин обґрунтовано конструкцію розпилювача, що забезпечує їх примусове осадження за рахунок індукованого повітряного потоку в прикореневій зоні факела.

Встановлено вплив швидкості вітру, відносної вологості та температури повітря, температури робочої рідини, робочого тиску й швидкості руху обприскувача на інтенсивність випаровування краплин.

Авторами [155] здійснено аналітичне обґрунтування параметрів штангового обприскувача, що визначають його технологічну продуктивність. Для розрахункової ширини захвату штанги наведено залежність, яка дозволяє оцінити нерівномірність розподілу робочої рідини за шириною захвату з урахуванням висоти встановлення

розпилювачів, кута факела розпилу (рис. 1.25) та кратності перекриття суміжних факелів.

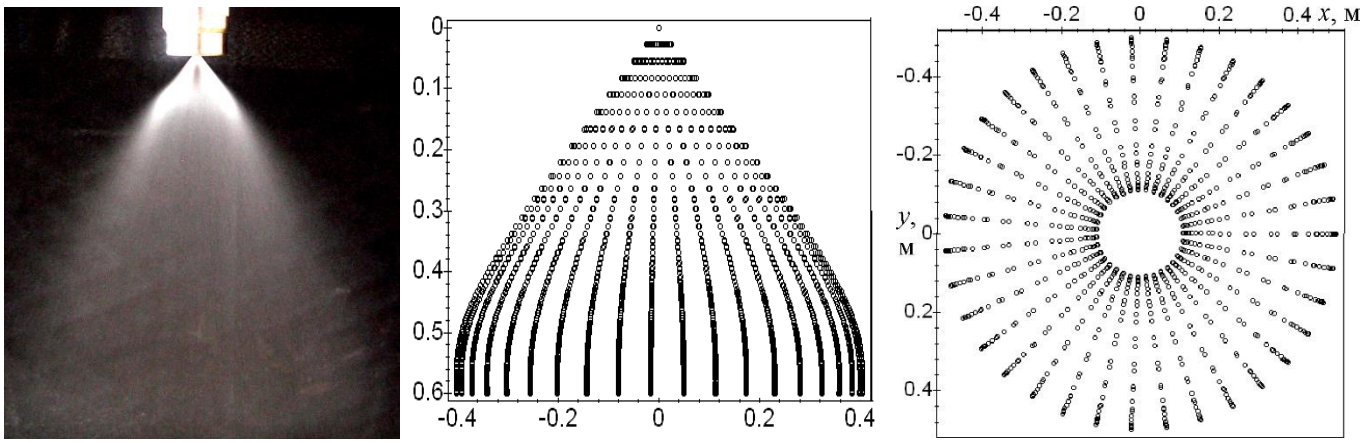


Рисунок 1.24 – Факел досліджуваного розпилювача [95]:
а – загальний вид факелу; б, в – змодельовані траєкторії руху краплин на виді збоку і зверху

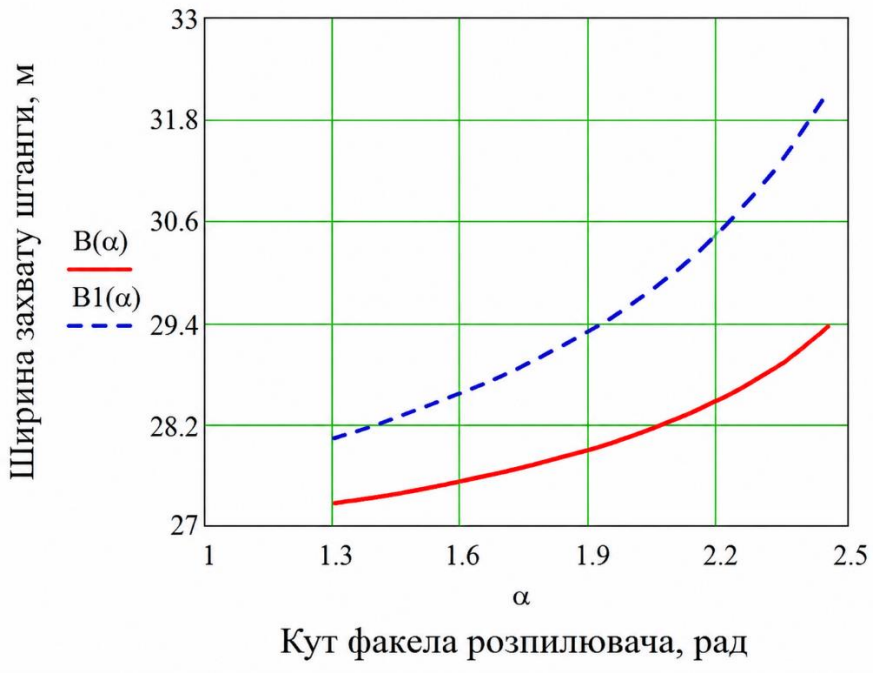


Рисунок 1.25 – Залежність ширини захвату штанги від кута розпилювача [155]

В монографії [156] наведено основні чинники, що визначають форму факела, розподіл розмірів краплин і ефективність перенесення робочої рідини на оброблювану поверхню, а також обґрунтовано можливість ступеневого зміщення

дисперсної складової розпилу шляхом зміни геометрії та співвідношень робочих камер розпилювача. Окрему увагу приділено механічним і аеродинамічним аспектам взаємодії струменя рідини з повітряним середовищем, що дозволяє оптимізувати конструкцію для конкретних технологічних умов агротехнічної обробки.

У науковій праці [157] встановлено, що тип і конструкція розпилювачів істотно впливають на середній діаметр крапель, рівномірність покриття та втрати робочої рідини внаслідок знесення.

Вагомий вплив на показники нерівномірності має положення штанги обприскувача (її висота, коливання). Українські дослідники експериментально підтвердили, що збільшення висоти штанги призводить до зменшення коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини [158-160].

Авторами [161] розглянуто особливості формування дисперсного потоку рідини під час розпилення та вплив конструктивних параметрів розпилювальних пристроїв на характеристики факела. Проаналізовано процес утворення крапель, їх розмірний склад та розподіл у потоці залежно від режимів подачі рідини і геометрії соплового каналу. Показано, що зміна робочих параметрів системи подачі рідини та конструкції розпилювача суттєво впливає на дисперсність крапель, дальність їх перенесення та рівномірність розподілу у факелі розпилення (рис. 1.26).

У дослідженні [162] проведено порівняльну оцінку ефективності розпилення за двох режимів роботи обприскувача: без системи контролю норми внесення (CNS) та із системою автоматичного регулювання витрати (SRC), при зміні швидкості руху агрегату. Встановлено, що для режиму CNS підвищення швидкості руху призводить до зменшення кількості крапель на одиницю площі та зниження рівня осідання робочої рідини. У режимі SRC показники щільності покриття та осадження характеризувалися більшою стабільністю завдяки автоматичній зміні витрати і тиску розпилення залежно від швидкості. Разом з тим варіації дисперсного складу крапель зі зростанням швидкості спостерігалися в обох режимах, однак були більш вираженими для SRC через динамічну зміну робочого тиску.

У роботі [163] розглянута методика оцінювання якості обприскування через параметри крапель (діаметр, покриття, ефективна зона дії), що дозволяє об’єктивно

порівнювати роботу різних розпилювальних пристроїв і режимів експлуатації. Автор також розкриває технологічні аспекти застосування різних видів робочих сумішей та робочого тиску, зокрема для оптимального застосування рідких комплексних добрив у поєднанні з пестицидами.

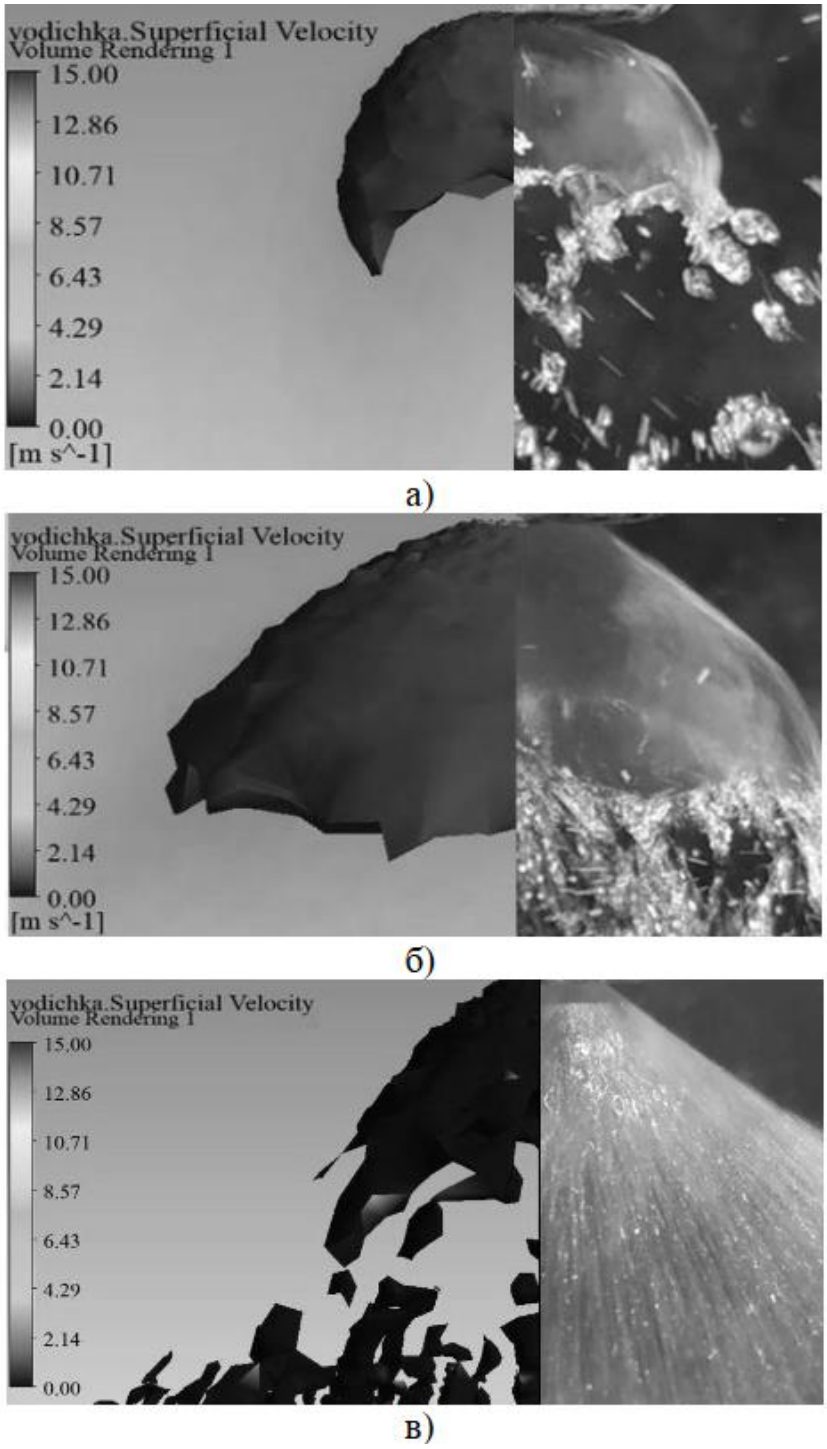
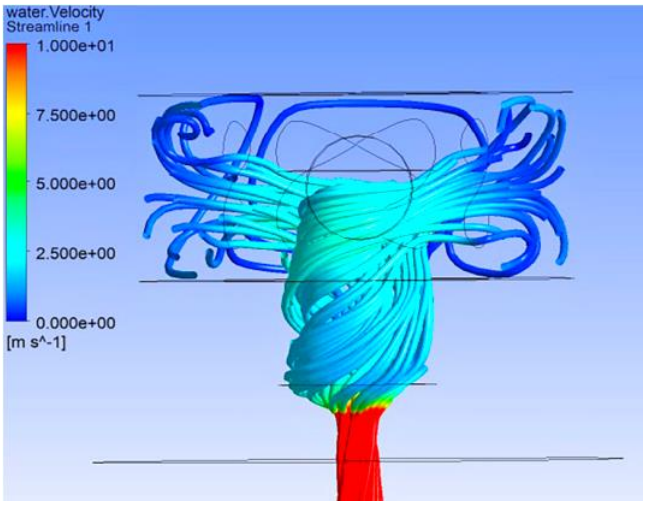
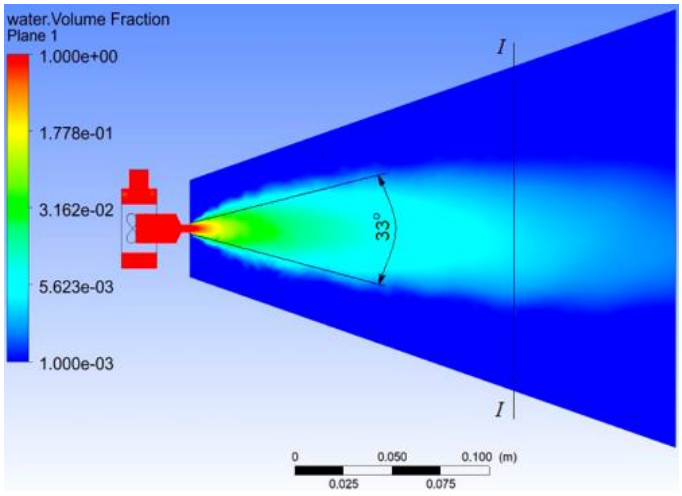


Рисунок 1.26 – Результати чисельного моделювання на експерименту розподілу рідини при витраті: а – 0,002 кг/с; б – 0,003 кг/с; в – 0,004 кг/с [161]

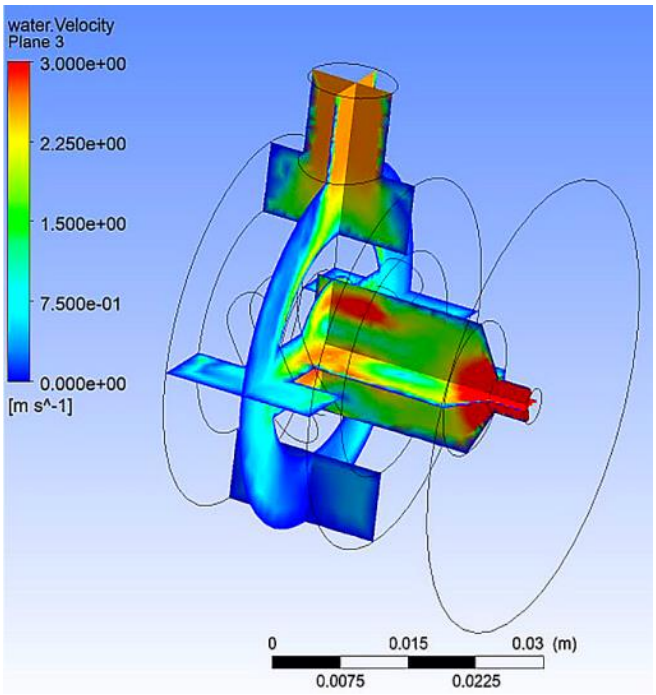
Авторами [165] досліджено конструктивні особливості форсунок із похилими підвідними каналами та їх вплив на характеристики розпилення рідини. Робота присвячена аналізу процесів формування струменя та дисперсності крапель під час роботи струминних сульфітаторів (рис. 1.27).



а



б



в

Рисунок 1.27 – Чисельне моделювання [165]:
а – процесу розпилення при нахилі вхідних каналів; б – об’ємної концетрації рідини;
в – швидкості рідини в розпилювачі з похилими каналами

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження гідродинамічних параметрів потоку рідини у проточній частині форсунки. Встановлено, що застосування похилих підвідних каналів сприяє формуванню більш інтенсивного закручування потоку, що покращує процес диспергування рідини та забезпечує більш рівномірний розподіл крапель у факелі розпилення.

Аналіз експериментальних і аналітичних досліджень свідчить, що підвищення ефективності внесення РМД можливе за рахунок раціонального вибору типу розпилювача, оптимізації його конструктивних параметрів і режимів роботи. Узагальнення наведених результатів є науковою основою для подальшого конструктивного удосконалення розпилювачів та обґрунтування параметрів їх роботи.

1.6 Обгрунтування конструктивно-технологічної схеми пристрою для внесення рідких мінеральних добрив

Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми пристрою для внесення рідких мінеральних добрив базується на комплексному аналізі гідродинамічних процесів формування факела розпилу та особливостей роботи розпилювачів, що встановлюються на штангах польових обприскувачів.

Аналіз існуючих гідравлічних розпилювачів показує, що при зміні робочого тиску та швидкості руху агрегату істотно змінюється дисперсний склад крапель. Це призводить до підвищення частки дрібнодисперсної фракції і, відповідно, до зростання втрат рідини унаслідок знесення. Крім того, нерівномірний розподіл рідини по ширині захвату штанги зумовлюється нестабільністю швидкісного профілю потоку в зоні вихідного отвору. Такі фактори знижують ефективність використання поживних речовин і погіршують агротехнічні показники процесу внесення.

Важливим показником рівномірності покриття **є** коефіцієнт варіації**,** який характеризує однорідність розподілу рідини по площі обробки. Низьке значення коефіцієнта варіації свідчить про рівномірне покриття, що забезпечує оптимальне використання добрив та мінімізацію втрат. Високий коефіцієнт варіації вказує на

нерівномірний розподіл рідини, що може призвести до утворення зон перенасичення або нестачі добрив на окремих ділянках поля.

Для забезпечення постійної рівномірності покриття важливе значення має конструкція розпилювача та режими роботи обприскувача, такі як, робочий тиск рідини, висота розташування штанги над цільовою поверхнею.

Для покращення якісних показників позакореневого та кореневого підживлення, запропоновано пристрій, який являє собою удосконалений розпилювач, конструкція якого забезпечує стабілізацію потоку робочої рідини перед виходом із соплового отвору та керване формування краплинної структури факела.

Розпилювач складається [166] з корпуса 1 (рис. 1.28), де з однієї сторони розташований отвір 2 для роботи розпилювача, як дефлекторного, а з іншої отвори 3 для роботи, як струменевого (додаток Б).

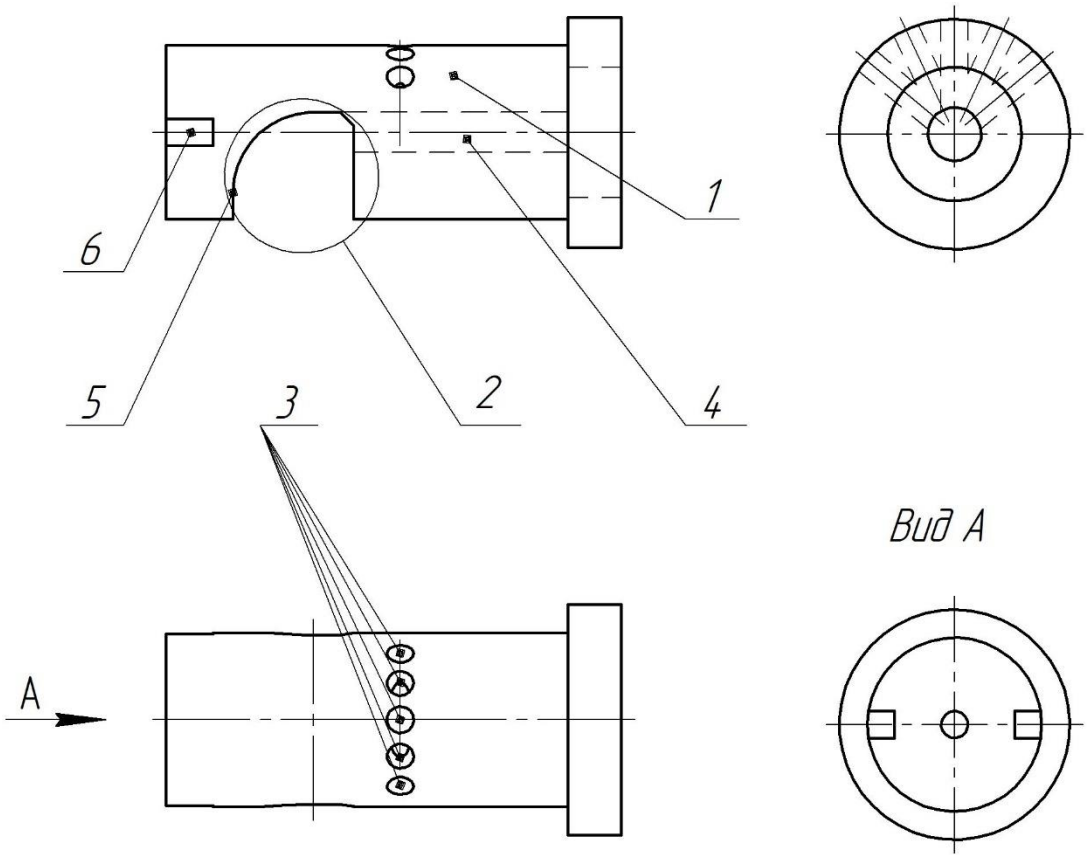


Рисунок 1.28 – Загальний вид комбінованого пристрою:
1 – корпус; 2 – отвір дефлекторний; 3 – отвір струменевий; 4 – канал корпуса;
5 – виступ; 6 – паз

Для зміни режиму між різними типами розпилювачів зверху робочої частини корпуса 1 встановлено ковпачок (рис. 1.29), який має аналогічні отвори 2 і 3, проте вони розташовані з однієї сторони ковпачка.

Для правильного суміщення корпуса і ковпачка є відповідні пази 6 та 7. Для фіксації ковпачка відносно корпуса в необхідному положенні використовується гвинт 8.

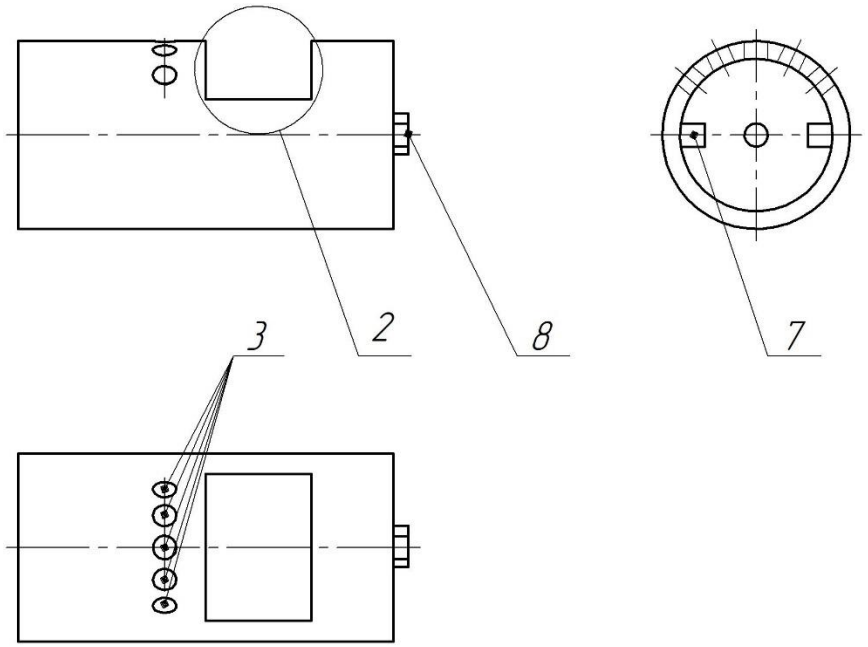


Рисунок 1.29 – Ковпачок до комбінованого пристрою:
2 – отвір дефлекторний; 3 – отвір струменевий; 7 – паз; 8 – гвинт.

Технологічно процес роботи пристрою здійснюється в складі штангового обприскувача. Під час руху агрегату робоча рідина з бака через насос і систему магістралей подається до розпилювачів, закріплених на штанзі. Робоча рідина потрапляє в канал 4 корпуса 1 і направляється до отвору 2, вдаряючись об виступ 5 рівномірно розпилюється на краплини по контуру отвору 2 без перенасичення рідиною центральної частини факелу розпилу. Поверхня дефлектора 2 виконана криволінійною, що сприяє рівномірному формуванню факелу розпилу, виключаючи

вихроутворення. В результаті покращується надійність і якість роботи, підвищується рівномірність розподілення рідини по ширині факела розпилу.

Завдяки удосконаленій конструкції соплового вузла формується факел із контрольованою дисперсністю крапель та рівномірною щільністю розподілу по площі обробки. При цьому зменшується частка крапель малого діаметра, що є основною причиною знесення, та забезпечується підвищення стабільності розпилення за коливань тиску в системі.

Обґрунтування вибору саме такої конструктивно-технологічної схеми полягає в поєднанні декількох принципових положень: забезпечення гідродинамічної стабілізації потоку перед виходом із сопла; оптимізація геометрії вихідного отвору для формування рівномірного факела; збереження сумісності з існуючими штанговими обприскувачами без внесення істотних змін у їх конструкцію.

1.7 Висновки з розділу

1. Проведений аналіз тенденцій споживання мінеральних добрив у світі та Україні показав, що після скорочення попиту у 2022–2023 рр. світовий ринок демонструє стійке відновлення, а загальне споживання добрив у 2025 році досягло рекордного рівня – близько 205 млн т діючої речовини. Найвищі обсяги внесення мінеральних добрив характерні для країн Західної Європи (понад 240 кг/га), тоді як в Україні цей показник залишається одним із найнижчих у Європі (55,6 кг/га), незважаючи на поступове відновлення після спаду 2022–2024 рр. Це свідчить про значний потенціал підвищення ефективності використання мінеральних добрив шляхом удосконалення конструкції розпилювальних пристроїв і технологій їх внесення.

2. Встановлено, що рідкі мінеральні добрива є перспективною формою живлення рослин завдяки високій доступності поживних речовин, рівномірності розподілу, можливості точного дозування та інтеграції із сучасними технологіями точного землеробства. Їх ефективність визначається способом внесення, глибиною локалізації, фізико-хімічними властивостями ґрунту, погодними умовами та

конструктивно-технологічними характеристиками технічних засобів. Застосування рідких добрив у поєднанні зі змінними нормами внесення, фертигацією та локальним підживленням забезпечує підвищення коефіцієнта використання поживних речовин, зменшення непродуктивних втрат і створює передумови для вдосконалення конструкцій розпилювальних пристроїв з метою підвищення якості їх внесення.

3. Проведений аналіз сучасних технологій внесення рідких мінеральних добрив показав, що кожна з існуючих технологічних схем має власні переваги та обмеження. Підґрунтове внесення культиваторами, сівалками та ін'єкторами забезпечує локалізацію добрив у кореневій зоні та високий коефіцієнт використання поживних речовин, однак потребує значних енергетичних витрат, залежить від стану ґрунту й характеризується обмеженою продуктивністю. Найбільш перспективними для поверхневого та позакореневого внесення є штангові обприскувачі, які забезпечують високу продуктивність, універсальність використання, можливість інтеграції із системами автоматичного керування, GPS-навігації та технологіями диференційованого внесення. Встановлено, що основними чинниками, які визначають ефективність їх роботи, є конструкція розпилювача, параметри факела розпилу, дисперсний склад крапель і рівномірність розподілу робочої рідини, що обґрунтовує необхідність подальшого вдосконалення розпилювальних пристроїв.

4. Встановлено, що конструкція розпилювача є визначальним чинником формування параметрів факела розпилу, дисперсного складу крапель, рівномірності розподілу робочої рідини та величини втрат унаслідок дрейфу. Аналіз сучасних конструкцій показав, що кожен тип розпилювачів (щілинні, інжекторні, дефлекторні, струменеві та аплікатори прикореневого внесення) має характерні переваги й обмеження залежно від умов застосування, режимів роботи та технології внесення. Відсутність універсального конструктивного рішення, здатного забезпечити ефективне поверхневе, позакореневе та локалізоване внесення рідких мінеральних добрив із мінімальними втратами, обґрунтовує необхідність розроблення комбінованого розпилювача зі змінними режимами роботи та керованими параметрами формування факела розпилу.

5. Аналіз експериментальних і аналітичних досліджень показав, що визначальними чинниками ефективності розпилення рідких мінеральних добрив є тип і конструкція розпилювача, робочий тиск, висота встановлення штанги, швидкість руху агрегату, фізико-хімічні властивості робочої рідини та метеорологічні умови. Встановлено, що зазначені фактори істотно впливають на середній діаметр крапель, кут факела розпилу, рівномірність поперечного розподілу робочої рідини, інтенсивність дрейфу та ефективність осадження крапель на цільовій поверхні. Показано, що сучасні методи експериментальних досліджень і CFD-моделювання є ефективним інструментом аналізу процесів формування факела розпилу та оптимізації конструктивно-технологічних параметрів розпилювачів. Водночас відсутність універсального технічного рішення, яке б одночасно забезпечувало стабільну норму подачі, мінімізацію дрейфу, локалізацію робочої рідини у цільовій зоні та адаптацію до змінних умов роботи.

6. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано конструктивно-технологічну схему комбінованого розпилювача для внесення рідких мінеральних добрив, принцип дії якого базується на гідродинамічній стабілізації потоку робочої рідини та можливості роботи у двох режимах розпилення – дефлекторному та струменевому. Встановлено, що поєднання в одній конструкції двох способів формування факела забезпечує керовану дисперсність крапель, підвищення рівномірності поперечного розподілу робочої рідини, зменшення частки дрібнодисперсної фракції та втрат унаслідок дрейфу. Запропонована конструкція сумісна з існуючими штанговими обприскувачами і створює передумови для подальшого теоретичного та експериментального обґрунтування її конструктивних параметрів і режимів роботи.

1.8 Мета і задачі досліджень

Мета дослідження – підвищення ефективності та якості внесення рідких мінеральних добрив шляхом розроблення й наукового обґрунтування конструктивно-режимних параметрів комбінованого розпилювача з дефлекторним і струменевим

режимами роботи на основі чисельного та експериментального дослідження процесу формування факела розпилу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв’язати такі задачі:

– проаналізувати сучасні технології та технічні засоби внесення рідких мінеральних добрив, конструкції розпилювачів і визначити основні фактори, що впливають на якість формування та розподілу факела;

– обґрунтувати конструктивно-технологічну схему комбінованого розпилювача з можливістю роботи у дефлекторному та струменевому режимах;

– розробити фізико-математичну модель формування факела на основі удосконаленої ELSA–DEM моделі та встановити критерії переходу від суцільної до дискретної фази робочої рідини;

– встановити закономірності впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт варіації інтенсивності факела та кут його розкриття, отримати й статистично обґрунтувати математичні моделі другого порядку;

– визначити раціональні конструктивні та режимні параметри комбінованого розпилювача шляхом багатокритеріальної оптимізації;

– експериментально дослідити гідравлічні, розподільні та дисперсні характеристики розробленого пристрою, перевірити адекватність математичних моделей і порівняти його характеристики із серійними розпилювачами;

– перевірити працездатність та ефективність комбінованого розпилювача в польових умовах і оцінити стабільність формування крапель та рівномірність покриття цільової поверхні;

– оцінити ефективність упровадження розробленої конструкції та визначити її техніко-економічну доцільність.

Основні наукові здобутки розділу підтверджені публікаціями автора [29, 34, 59, 75, 100, 187].

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПОТОКУ РОБОЧОЇ РІДИНИ В КОМБІНОВАНОМУ РОЗПИЛЮВАЧІ

2.1 Постановка задачі теоретичних досліджень

Розпилювальні системи, що застосовуються в сільськогосподарській техніці для внесення рідких мінеральних добрив, є невід'ємною складовою сучасних технологій агровиробництва. Одним із ключових елементів таких систем є розпилювач, який забезпечує формування факела розпилу, рівномірний розподіл робочої рідини по оброблюваній поверхні та ефективність використання добрив. Його ефективність визначається можливістю точного дозування рідини, формування необхідного спектра крапель і надійністю роботи. Підвищення якості розпилення сприяє зменшенню втрат добрив, підвищенню їх засвоюваності рослинами та забезпеченню екологічної безпеки технологічного процесу. При цьому характеристики факела розпилу безпосередньо впливають на процеси взаємодії рідини з повітряним потоком, осадження крапель на поверхні рослин і загальну ефективність внесення добрив.

У розділі 1 показано, що значна кількість наукових досліджень присвячена аналізу характеристик розпилення рідин із використанням сучасних оптичних методів і засобів чисельного моделювання. Застосування методів обчислювальної гідродинаміки дає можливість досліджувати процеси змішування рідини з повітрям, диспергування струменя та взаємодії крапель із навколишнім середовищем.

Експериментальні дослідження, результати яких наведено у розділах 3–4, показали, що після виходу рідини із сопла спочатку формується суцільний рідинний струмінь, який у процесі руху руйнується на окремі краплі різного розміру. У ближньому полі факела одночасно існують суцільна рідинна фаза, великі краплі та рідинні плівки, тоді як у дальньому полі переважає дисперсна система дрібних крапель. Отже, факел розпилу є двофазною системою, співвідношення між суцільною

рідинною фазою та диспергованими краплями якої безперервно змінюється вздовж осі струменя.

Первинне руйнування струменя поблизу вихідного отвору сопла є одним із визначальних етапів формування дисперсного складу факела. Результати експериментальних досліджень свідчать, що на початковій стадії відбувається утворення деформованих об'ємів рідини, які внаслідок розвитку гідродинамічної нестійкості розпадаються на дрібні краплі. Разом із тим процеси первинної атомізації, розвитку кавітаційних явищ усередині сопла та їх вплив на характеристики факела залишаються недостатньо дослідженими. Тому використання *методів обчислювальної гідродинаміки (CFD)* є доцільним для дослідження внутрішніх гідродинамічних процесів і вдосконалення конструкції сучасних розпилювачів.

Останніми роками значного поширення набули чисельні моделі, призначені для моделювання процесів диспергування рідини. Однією з найбільш ефективних є *Ейлерово–Лагранжева модель розпилювальної атомізації (ELSA)*, яка забезпечує спільний опис суцільної рідинної фази та дисперсної фази крапель у зоні інтенсивного розпилення. Застосування цієї моделі дозволяє адекватно відтворювати процеси формування щільної зони факела, руйнування суцільного струменя та подальшого утворення крапель. Важливим елементом моделі є узгодження ейлерового та лагранжевого підходів шляхом використання критеріїв переходу між фазами, які ґрунтуються на значеннях об'ємної частки рідини або характеристиках дисперсної фази.

З огляду на складність зазначених процесів постановку задачі теоретичних досліджень, спрямованих на їх вивчення, наведено на рис. 2.1.

Таким чином, метою теоретичних досліджень є розроблення чисельної CFD-моделі гідродинамічних процесів трансформації потоку робочої рідини в порожнинах комбінованого розпилювача та під час виходу із сопла із застосуванням Ейлерово–Лагранжевої моделі розпилювальної атомізації (ELSA) для встановлення закономірностей формування факела розпилу та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів розпилювача.

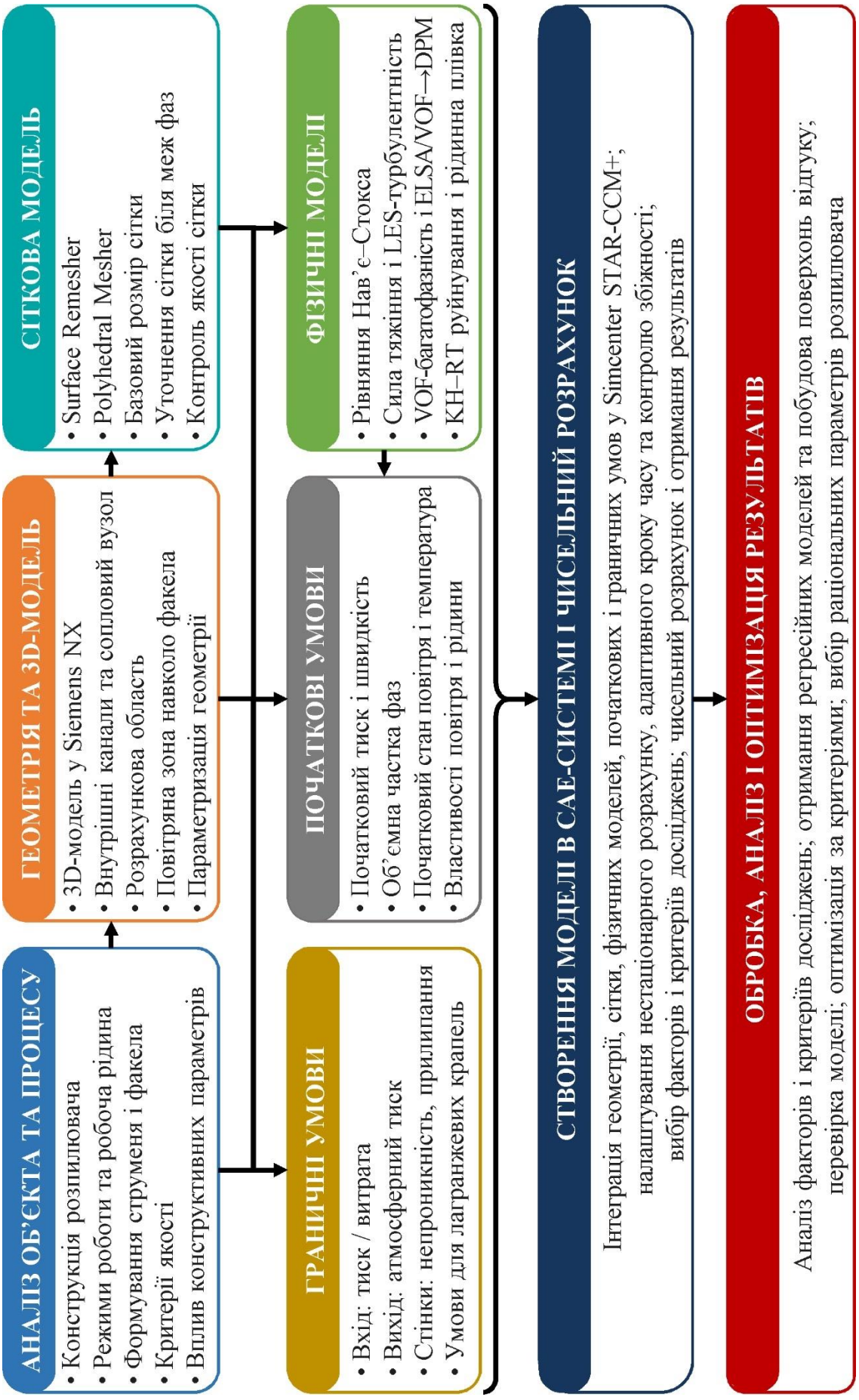


Рисунок 2.1 – Постановка задачі теоретичних досліджень

2.2 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання

У підході Ейлера–Лагранжа дисперсна фаза у вигляді окремих крапель відстежується в розрахунковій області. Модуль відстеження частинок використовує фізичні властивості окремих крапель для врахування обміну масою, імпульсом, теплом та компонентами з безперервною фазою (повітряним середовищем). Однак у зонах із високою концентрацією крапель (щільний факел розпилу) ігнорування витіснення газу краплями може призводити до зниження точності моделювання процесу розпилення добрив.

У рамках ейлерового підходу з використанням методу об’ємної частки рідини (VOF) у кожній комірці розрахункової сітки зберігається частка рідкої фази. Межа поділу «рідина–газ» відстежується за допомогою явних чисельних схем. Для коректного опису кожної краплі розмір комірок сітки повинен бути меншим за розмір найменших крапель, що вимагає значного згущення сітки та зменшення кроку за часом. Це суттєво підвищує обчислювальні витрати та потребує значних ресурсів.

Комбінований підхід переходу від VOF до дискретної моделі частинок (DPM) поєднує переваги обох методів. Початкове формування струменя та його первинне руйнування поблизу сопла розпилювача моделюється за допомогою VOF на дрібній сітці, тоді як зона розрідженого факела (дисперсна фаза крапель) описується за допомогою лагранжевого підходу (DPM). Перехід від VOF до DPM здійснюється за заданим критерієм, зокрема за діаметром крапель. Якщо відокремлені від суцільного струменя об’єми рідини відповідають умовам переходу, вони перетворюються на лагранжеві частинки (пакети крапель).

Траєкторія руху крапель у програмному середовищі, зокрема в Simcenter Star-CCM+, визначається шляхом інтегрування рівняння руху частинки у лагранжевій системі координат. Рівняння базується на балансі сил, що діють на краплю, включаючи сили опору, гравітації та інші додаткові впливи:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \vec{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \vec{F}, \qquad (2.1)$$

де m_p – маса краплини, кг; u – швидкість повітряного потоку, м/с; u_p – швидкість краплини, м/с; ρ, ρ_p – густини повітря та рідини відповідно, кг/м^3; F – додаткові сили, Н; τ_r – час релаксації краплини, с.

Час релаксації краплини визначається як:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{24}{C_d \mathrm{Re}}, \tag{2.2}$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с; d_p – діаметр краплини, м; C_d – коефіцієнт опору; Re – відносне число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu}. \tag{2.3}$$

Розрахунок траєкторій крапель здійснюється шляхом покрокового інтегрування рівнянь руху та додаткових рівнянь тепло- і масообміну. Положення краплі визначається співвідношенням:

$$\frac{dx}{dt} = u_p. \tag{2.4}$$

Система рівнянь руху є зв'язаною системою звичайних диференціальних рівнянь і може бути подана у вигляді:

$$\frac{du_p}{dt} = u_p(u - u_p) + a, \tag{2.5}$$

де a – прискорення, зумовлене всіма силами, крім сили аеродинамічного опору, м/с^2.

Аналітичне інтегрування цієї системи для сталих параметрів дозволяє визначити швидкість краплі на наступному кроці n:

$$u_p^{n+1} = u^n + e^{-\Delta t/\tau_p}(u_p^n - u^n) - a\tau_p\left(e^{-\Delta t/\tau_p} - 1\right), \tag{2.6}$$

У процесах розпилення рідких мінеральних добрив, особливо при високих тисках і швидкостях витікання з сопла, формування факела є нестаціонарним процесом із нестабільною турбулентною міжфазною межею «рідина–повітря». Це призводить до вираженої анізотропії потоку під час первинного руйнування струменя та формування краплин.

Для опису турбулентної структури повітряного потоку в даному дослідженні використано метод великомасштабного моделювання – LES (Large Eddy Simulation). Газова (повітряна) фаза описується в ейлеровій постановці на основі рівнянь Нав'є–Стокса. Для нестисливої рідини базові рівняння LES отримують шляхом просторової фільтрації рівнянь неперервності та імпульсу.

Рівняння руху відфільтрованого потоку мають вигляд:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u}_i \overline{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \overline{\tau}_{ij}}{\partial x_j}, \tag{2.7}$$

та рівняння неперервності:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0, \tag{2.8}$$

де u_i, u_j – компоненти швидкості потоку, м/с; p – тиск, Па; ρ – густина повітря, кг/м^3; ν – кінематична в'язкість, м^2/с.

Тензор підсіткових напружень Рейнольдса (SGS) визначається як:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u}_i \overline{u}_j, \tag{2.9}$$

Для замикання системи рівнянь використовується модель турбулентної (вихрової) в'язкості, згідно з якою:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\tau_{kk} = 2\nu_T \overline{S}_{ij}, \tag{2.10}$$

де ν_T – коефіцієнт підсіткової турбулентної в'язкості, м^2/с; δ_{ij} – символ Кронекера; S_{ij} – тензор швидкостей деформації, с$^{-1}$:

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right). \tag{2.11}$$

Узагальнене (замкнене) рівняння руху набуває вигляду:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u}_i \overline{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\overline{p} + \rho\frac{\delta_{ij}}{3}\overline{u'_k u'_k}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu + \nu_T)\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right)\right]. \tag{2.12}$$

Для опису багатофазного потоку у факелі розпилу використовується рівняння неперервності з урахуванням об'ємної частки фази:

$$\nabla(\alpha_l \rho_l \bar{u}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + S_M, \tag{2.13}$$

де α_l – об'ємна частка рідкої фази (добрива); ρ_l – густина рідини, кг/м^3; S_M – джерело маси.

Енергетичне рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\rho E \bar{u}) = \nabla(k \nabla T) + \nabla(p\bar{u}) + S_E, \tag{2.14}$$

де k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); E – питома внутрішня енергія, Дж/кг; S_E – джерело енергії, Вт/м^3.

Середня внутрішня енергія двофазної системи визначається як:

$$E = \frac{\alpha_l \rho_l E_l + \alpha_v \rho_v E_v}{\alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v}, \tag{2.15}$$

де α_v – об'ємна частка (повітряної) фази; ρ_v – густина газової (повітряної) фази, кг/м^3.

Для моделювання процесу розпилення рідких мінеральних добрив використано підхід ELSA, який ефективно поєднує ейлеровий опис течії в принасадковій зоні з лагранжевим описом дисперсної фази. У зоні безпосередньо біля сопла, де формується суцільний струмінь і відбувається його первинне руйнування, застосовується ейлеровий підхід для розв'язання рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії для обох фаз.

У міру віддалення від сопла, де формується дисперсний факел із окремих крапель, використовується лагранжевий підхід для опису руху, тепло- та масообміну окремих крапель. Для моделювання процесу руйнування струменя застосовано комбіновану модель Кельвіна–Гельмгольца та Релея–Тейлора (KH–RT), яка враховує розвиток поверхневих хвиль і нестійкостей, що призводять до утворення крапель.

У процесі первинного руйнування струменя в моделі ELSA виділяються дві характерні області:

– зона суцільного рідинного струменя;

– зона дисперсних крапель.

Газова (повітряна) фаза описується в ейлеровій постановці, тоді як рідка фаза (добриво) після розпаду струменя – у лагранжевій. Протягом усього процесу

розпилення обидва підходи співіснують, що дозволяє адекватно описати як щільну принасадкову область, так і розріджений факел.

Для забезпечення коректного переходу між ейлеровою та лагранжевою областями використано вдосконалену модель ELSA, у якій ключовими критеріями переходу є:

– сферичність краплі (S_p);

– середній діаметр частинок (D).

Сферичність використовується для визначення моменту формування окремої краплі (наближення її форми до сферичної), що є ознакою переходу до дисперсної фази. Діаметр краплі визначає її подальшу поведінку, зокрема участь у вторинному руйнуванні та транспорті в повітряному потоці. З огляду на тісний зв’язок між сферичністю та розміром крапель, у даному дослідженні основну увагу приділено саме діаметру, тоді як сферичність прийнята сталою.

Сучасні підходи до визначення середнього діаметра крапель базуються на теорії руйнування рідинної плівки під дією поверхневих хвиль. Класичні моделі (TAB, WAVE, KH–RT) описують деформацію та руйнування крапель під впливом аеродинамічних сил і нестійкостей.

У даному підході розглядається механізм руйнування несталого рідинного шару, характерного для факела розпилу добрив. Спочатку формується тонка рідинна плівка, яка під дією аеродинамічних сил і поверхневого натягу втрачає стійкість. Зростання амплітуди хвиль на її поверхні з часом призводить до розриву плівки та утворення крапель.

На сучасному етапі розрахункові залежності для визначення середнього діаметра крапель ґрунтуються на теорії руйнування рідинного струменя під дією хвильових збурень на його поверхні. До класичних моделей опису дроблення належать TAB, WAVE та KH–RT, які по-різному інтерпретують механізми деформації та руйнування крапель.

Зокрема, у моделі TAB крапля розглядається як пружна система, аналогічна коливанням пружини, а її руйнування визначається ступенем деформації. У моделях WAVE та KH–RT процес відокремлення крапель пов’язаний із розвитком нестійких

хвиль на поверхні струменя або рідинної плівки, що призводить до їх поступового відриву від основного потоку.

На відміну від класичних підходів, у даному дослідженні розглядається процес руйнування несталого рідинного шару, характерного для факела розпилу мінеральних добрив. На початковому етапі формується тонка рідинна плівка, яка під дією аеродинамічних збурень втрачає стійкість. Руйнування відбувається в момент, коли сили аеродинамічного опору перевищують сили поверхневого натягу, що зумовлює утворення перших великих краплин:

$$p_l - p_{gj} - 2\mu_l \frac{\partial v_l}{\partial y} \pm \sigma_l \frac{\partial^2 \xi_j}{\partial x^2} < 0, \tag{2.16}$$

де p_l – тиск у рідині, Па; p_g – тиск газового середовища, Па; μ_l – динамічна в'язкість рідини, Па·с; v_l – дотична швидкість уздовж струменя, м/с; σ_l – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; ξ – амплітуда хвильового збурення, м.

Зростання амплітуди поверхневих хвиль із часом описується експоненціальною залежністю:

$$\xi = \xi_0 e^{\omega t}, \tag{2.17}$$

де ω – швидкість росту нестійкості, м/с.

Оцінка середнього діаметра краплин може бути отримана на основі рівноваги сил поверхневого натягу та гравітації:

$$D = 3{,}3\sqrt{\frac{\sigma_l}{\rho_l g}}, \tag{2.18}$$

де σ_l – поверхневий натяг рідкого добрива, Н/м; ρ_l – густина рідини, кг/м^3; g – прискорення вільного падіння, м/с^2.

Разом із тим, для дрібнодисперсного розпилу, характерного для сучасних розпилювачів, істотний вплив має опір повітря. З урахуванням аеродинамічних сил діаметр крапель доцільно визначати через результуюче прискорення:

$$D = 3{,}3\sqrt{\frac{\sigma_l}{\rho_l a_r}}, \tag{2.19}$$

де a_r – прискорення, зумовлене дією сумарної сили, включаючи опір повітря, м/с^2.

Рівнодійна сила F_r, що діє на краплину рідкого добрива в повітряному потоці, визначається як різниця між силою аеродинамічного опору та силою тяжіння (рис. 2.2):

$$F_r = F_f - mg = ma_r \,, \tag{2.20}$$

де F_f – сила опору повітря, Н; m – маса краплини, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; a_r – прискорення, зумовлене дією результуючої сили, м/с^2.

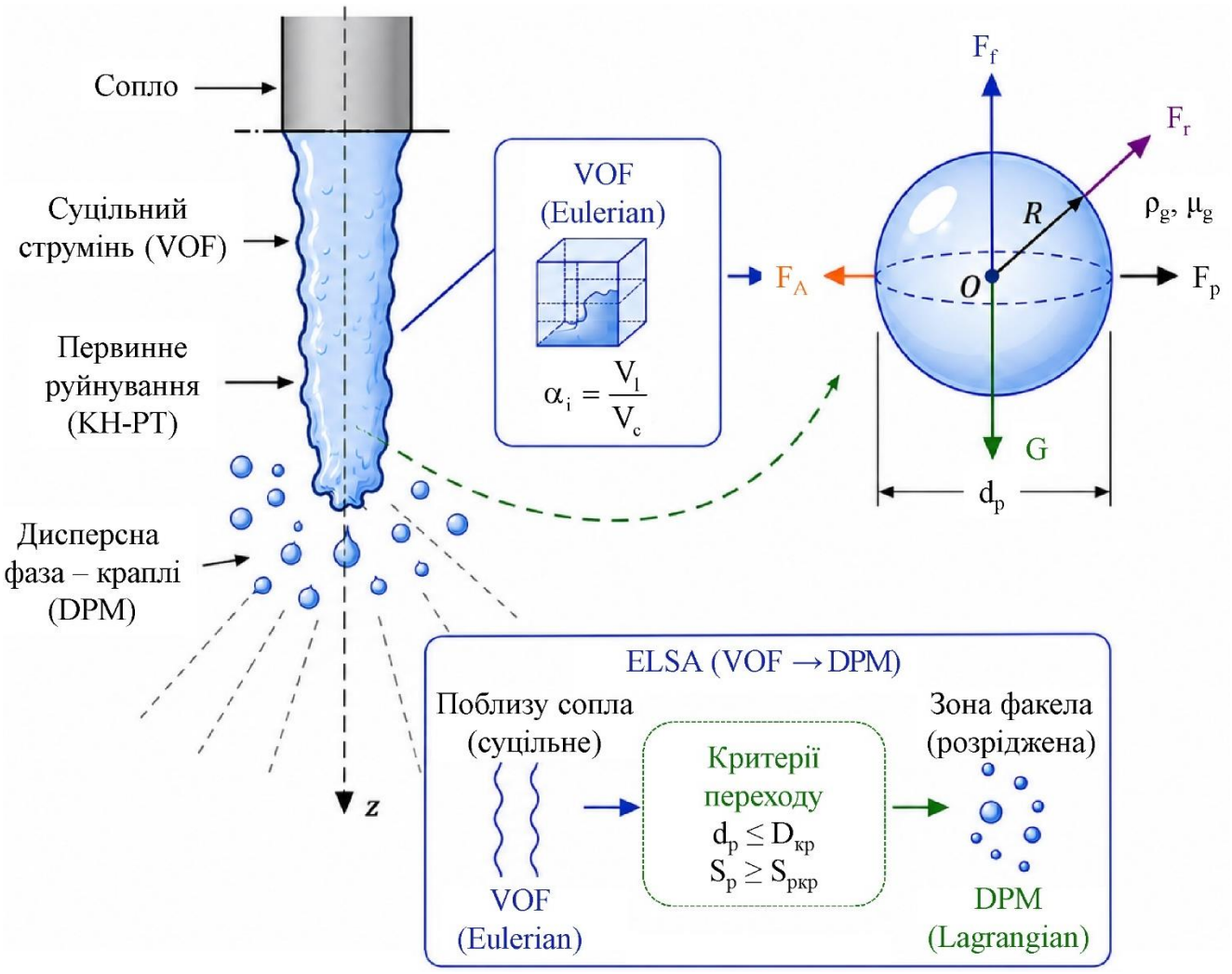


Рисунок 2.2 – Візуальна модель переходу відокремлених об’ємів рідини у лагранжеві частинки (пакети краплин)

Сила аеродинамічного опору визначається залежністю:

$$F_f = \frac{1}{2} C \rho_g A v^2 \,, \tag{2.21}$$

де C – коефіцієнт аеродинамічного опору; ρ_g – густина повітря, кг/м^3; v – відносна швидкість краплини та повітряного потоку, м/с; A – лобова (проєкційна) площа краплі, м^2.

У розрахунках приймається, що крапля має сферичну форму, тому її проєкційна площа визначається як:

$$A = \pi R^2, \tag{2.22}$$

де R – радіус краплини, м.

Прискорення, спричинене дією сили опору повітря, визначається як:

$$a_f = \frac{F_f}{m_l} = \frac{F_f}{\rho_l V_p}, \tag{2.23}$$

де ρ_l – густина рідкого добрива, кг/м^3; V_p – об'єм краплини, м^3.

Об'єм сферичної краплини визначається виразом:

$$V_p = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{A_p}{4\pi}\right)^{\frac{3}{2}}. \tag{2.24}$$

Після підстановки відповідних залежностей отримаємо вираз для прискорення від сили опору:

$$a_f = \frac{3C\rho_g v^2}{8\rho_l\sqrt{A/\pi}}. \tag{2.25}$$

З урахуванням одночасної дії сили опору повітря та сили тяжіння середній діаметр краплин у факелі розпилу визначається як:

$$D = 3{,}3\sqrt{\frac{\sigma_l}{\rho_l(a_f - g)}}, \tag{2.26}$$

або з урахуванням параметрів повітряного потоку:

$$D = 3{,}3\sqrt{\frac{\sigma_l}{\rho_l\left(\frac{3C\rho_g v^2}{8\rho_l\sqrt{A/\pi}} - g\right)}}, \tag{2.27}$$

На початковому етапі розрахунок усього поля течії виконується в ейлеровій постановці до моменту, коли рідка фаза (струмінь добрива) досягає умов переходу в дисперсний стан. Після цього у відповідній області застосовується лагранжевий підхід, у межах якого моделюється рух окремих крапель до завершення розрахунку.

У класичній реалізації моделі ELSA розрахункова область попередньо розбивається на ейлерову та лагранжеву зони, причому таке розбиття є фіксованим для заданих граничних умов. Однак у разі зміни режимів роботи розпилювача (наприклад, тиску подачі робочої рідини або швидкості повітряного потоку) виникає необхідність повторного формування сітки та перерозподілу областей, що ускладнює практичне застосування моделі.

Використано удосконалений підхід на основі моделі ELSA (рис. 2.3).

У роботі для чисельного моделювання використано програмний комплекс Simcenter STAR-CCM+, який реалізує сучасний підхід до моделювання багатофазних течій та процесів розпилення. Середовище STAR-CCM+ забезпечує інтегроване використання рівнянь Нав'є–Стокса, моделей турбулентності, багатофазних моделей та лагранжевого відстеження частинок у межах єдиної розрахункової схеми. Для опису процесів первинного та вторинного руйнування струменя застосовано удосконалену Ейлерово–Лагранжеву модель розпилювальної атомізації (ELSA), яка реалізована засобами програмного комплексу та доповнена динамічним алгоритмом переходу між фазами.

У удосконаленому підході перехід між ейлеровою та лагранжевою областями визначається динамічно за двома критеріями:

– критичною сферичністю крапель S_{pcr} (у роботі прийнято $S_{pcr} = 0,5$);

– середнім характерним діаметром крапель D_{cr}.

У середовищі Simcenter STAR-CCM+ ці критерії аналізуються на кожному часовому кроці розрахунку. Після досягнення краплею заданих значень сферичності та характерного діаметра програмний комплекс автоматично виконує перехід від ейлерового опису суцільної рідинної фази до лагранжевого опису окремих крапель без необхідності ручного визначення межі розділу фаз. Це забезпечує безперервне узгодження двох підходів у процесі моделювання та підвищує точність прогнозування характеристик факела розпилу.

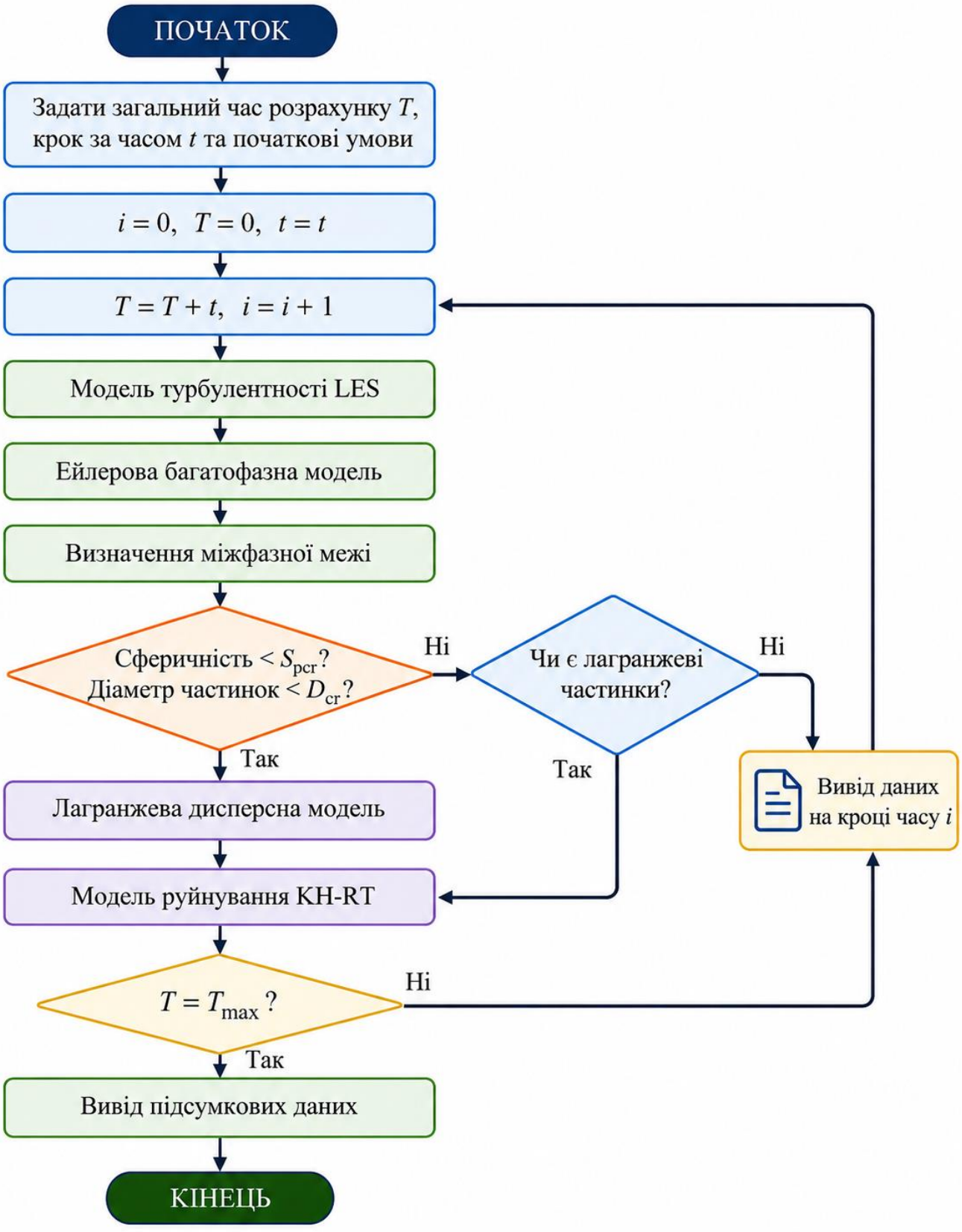


Рисунок 2.3 – Алгоритм моделювання удосконаленої моделі ELSA

На відміну від класичного підходу, де межа поділу фаз задається наперед, у запропонованій моделі вона визначається в процесі розрахунку на основі поточних

характеристик факела розпилу. Спочатку розрахунок виконується в ейлеровій постановці. У момент, коли частинки рідини досягають заданих критеріїв сферичності та розміру, вони автоматично переводяться в лагранжеву фазу, де далі відстежується їх рух як окремих крапель.

У процесі роботи розпилювача відбувається безперервне перетворення рідинного струменя на дисперсну систему крапель, що супроводжується зміною положення та часу появи лагранжевих частинок. Таким чином, перехід між фазами має нестаціонарний (часозалежний) характер, на відміну від стаціонарного підходу в класичній моделі ELSA.

Запропонований підхід, реалізований у середовищі Simcenter STAR-CCM+, забезпечує гнучке визначення межі переходу між фазами при зміні робочого тиску, витрати робочої рідини, параметрів повітряного потоку та конструктивних характеристик розпилювача. Це дозволяє адекватніше відтворювати процеси формування факела розпилу рідких мінеральних добрив, підвищує достовірність чисельного моделювання та створює передумови для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів комбінованого розпилювача.

2.3 Методика чисельного моделювання

Для побудови тривимірної геометричної моделі комбінованого розпилювача використано програмне середовище Siemens NX, тоді як генерацію розрахункової сітки та чисельне моделювання гідродинамічних процесів виконано в програмному комплексі Simcenter STAR-CCM+.

Для дискретизації розрахункової області застосовано генератор поверхневої сітки (Surface Remesher) та генератор поліедральних комірок (Polyhedral Mesher). Поверхнева сітка будувалася трикутними елементами з активованим уточненням кривизни (Surface Curvature Refinement) та близькості поверхонь (Surface Proximity Refinement), що забезпечило коректне відтворення складної геометрії внутрішніх каналів і соплового вузла. Для підвищення якості дискретизації використовувалась

функція вирівнювання поверхневої сітки (Create Aligned Meshes), а мінімальна якість грані становила 0,05.

Об'ємна розрахункова сітка формувалася за допомогою Polyhedral Mesher із використанням оптимізатора сітки (Mesh Optimizer), що дозволило підвищити якість поліедральних комірок і покращити збіжність чисельного розрахунку.

Базовий розмір комірки розрахункової сітки прийнято 0,001 м, що забезпечило необхідну точність відтворення гідродинамічних процесів у внутрішніх порожнинах розпилювача та зоні формування факела розпилу при прийнятних обчислювальних витратах.

Для чисельного моделювання процесів трансформації потоку робочої рідини в порожнинах комбінованого розпилювача та формування факела розпилу в програмному комплексі Simcenter STAR-CCM+ використано комплекс взаємопов'язаних фізичних моделей, які забезпечують адекватне відтворення процесів руху рідини, руйнування суцільного струменя, утворення крапель та їх подальшої взаємодії з повітряним середовищем.

Розрахунок виконувався у тривимірній (Three-Dimensional) нестаціонарній постановці із застосуванням неявної схеми інтегрування за часом (Implicit Unsteady) та адаптивного кроку часу (Adaptive Time Step), що забезпечує автоматичний вибір величини часового кроку залежно від розвитку процесу розпилення та підвищує стійкість чисельного розрахунку. Для підвищення точності просторової апроксимації використовувалося обчислення градієнтів (Gradient Reconstruction), а локальне уточнення розрахункової області здійснювалося за допомогою адаптивної сітки (Adaptive Mesh Refinement).

Газорідинний потік описувався розділеною багатофазною моделлю (Segregated Flow) із використанням двох ейлерових фаз – повітря (Air) та робочої рідини (Water). Для кожної фази приймалися сталі значення густини, а теплові процеси враховувалися за допомогою моделі розділеної багатофазної температури (Segregated Multiphase Temperature). Вплив сили тяжіння враховувався шляхом активації моделі Gravity, що є необхідним для коректного опису руху крапель та формування рідинної плівки.

Первинне руйнування струменя моделювалося в ейлеровій постановці за допомогою VOF-моделі (Volume of Fluid), яка дозволяє визначати положення міжфазної поверхні між повітрям та рідиною з урахуванням сил поверхневого натягу.

Після досягнення критичних значень сферичності S_{pcr} та характерного діаметра D_{cr}, відповідно до алгоритму удосконаленої моделі ELSA (рис. 2.3), здійснювався автоматичний перехід до лагранжевого опису. Для цього використовувалася Lagrangian Multiphase Model, яка включає:

– двосторонній обмін імпульсом між фазами (Two-Way Coupling);

– модель сферичних частинок (Spherical Particles);

– модель рідкої фази з постійною густиною;

– дію сили градієнта тиску;

– відстеження температури лагранжевих частинок.

Вторинне руйнування крапель виконувалося із застосуванням KH–RT Breakup Model, що забезпечує моделювання механізмів Кельвіна–Гельмгольца та Релея–Тейлора і дозволяє адекватно описувати подальшу диспергацію крапель після їх відокремлення від суцільного струменя.

Для опису процесів осадження рідини на поверхнях розпилювача використовувалася модель рідинної плівки (Liquid Film Model). Модель забезпечує розрахунок формування, розтікання та подальшої взаємодії рідинної плівки із лагранжевими краплями. При цьому враховуються:

– взаємодія фаз VOF–VOF;

– взаємодія VOF–лагранжева фаза;

– взаємодія лагранжевих крапель із рідинною плівкою;

– взаємодія рідинної плівки із суцільною фазою;

– поверхневий натяг;

– зіткнення крапель із плівкою;

– модель Resolved Transition, яка забезпечує автоматичний перехід між ейлеровим та лагранжевим описом.

Аналіз існуючих гідравлічних розпилювачів (розділ 1) показує, що при зміні робочого тиску та швидкості руху агрегату істотно змінюється дисперсний склад

крапель. Це призводить до збільшення частки дрібнодисперсної фракції і, відповідно, до зростання втрат робочої рідини внаслідок знесення. Крім того, нерівномірний розподіл рідини по ширині захвату штанги обумовлюється зміною швидкісного профілю потоку на виході із соплового вузла. Сукупність цих факторів знижує ефективність використання поживних речовин та погіршує агротехнічні показники процесу внесення.

Для кількісної оцінки впливу конструктивних і режимних параметрів на процес формування факела розпилу під час чисельного моделювання прийнято систему критеріїв, яка характеризує *рівномірність розподілу робочої рідини* та *просторову розвиненість факела*. Оскільки в межах дослідження розглядається робота одного струменевого розпилювача без урахування взаємного перекриття факелів суміжних розпилювачів, оцінювання здійснюється безпосередньо за параметрами сформованого факела.

Основним критерієм якості розпилення прийнято *коефіцієнт варіації інтенсивності факела* ψ. Для його визначення на заданій відстані h – 50 мм від вихідного перерізу розпилювача формується контрольна площина, яка умовно розбивається на N однакових ділянок. Для кожної ділянки визначається кількість робочої рідини, що перетнула контрольну поверхню за певний проміжок часу. Локальна інтенсивність розпилення визначається за залежністю

$$I_i = \frac{m_i}{A_i t}, \tag{2.28}$$

де I_i – локальна інтенсивність розпилення в і-й контрольній зоні, кг/(м²·с); m_i – маса робочої рідини, що перетнула і-ту контрольну зону, кг; A_i – площа контрольної зони, м²; t – час моделювання, с.

Для CFD/DEM-моделювання значення m_i визначається шляхом інтегрування масової витрати рідкої фази або сумарної маси крапель, які перетинають відповідну контрольну поверхню.

Середня інтенсивність розпилення визначається як

$$\bar{I} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I_i. \tag{2.29}$$

Середньоквадратичне відхилення локальних значень інтенсивності становить

$$S_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(I_i - \bar{I})^2}{N-1}}. \tag{2.30}$$

На основі отриманих значень визначається коефіцієнт варіації інтенсивності факела:

$$\psi = \frac{S_I}{\bar{I}} \cdot 100\% \tag{2.31}$$

де ψ – коефіцієнт варіації інтенсивності факела, %.

Даний показник є основним критерієм оцінювання рівномірності формування факела. Чим менше значення ψ, тим рівномірніше робоча рідина розподіляється в межах сформованої зони розпилення. Тому при оптимізації конструктивних параметрів струменевого розпилювача прагнуть до $\psi \to \min$.

Другим критерієм прийнято *кут розкриття факела* β, який характеризує просторову розвиненість струменевого потоку та визначає потенційну ширину зони розпилення. Для симетричного факела його визначають за геометричними параметрами на контрольній площині:

$$\beta = 2\arctan\left(\frac{B}{2h}\right) \tag{2.32}$$

де β – кут розкриття факела, °; B – ширина факела на контрольній площині, м; h – відстань від вихідного перерізу розпилювача до контрольної площини, м.

Ширину факела (B) визначають за крайніми координатами зон, у яких інтенсивність розпилення перевищує прийнятий пороговий рівень:

$$B = x_{max} - x_{min}. \tag{2.33}$$

Для забезпечення об'єктивності порівняння різних конструкцій розпилювача порогове значення інтенсивності повинно бути однаковим для всіх варіантів моделювання. Доцільно прийняти його на рівні 5 % від максимальної інтенсивності:

$$I(x) \geq 0,05 I_{max}. \qquad (2.33)$$

Збільшення кута розкриття факела відповідає збільшенню ширини зони потенційного покриття. Тому для цього критерію раціональним напрямком оптимізації є $\beta \to max$.

Для підвищення ефективності позакореневого та кореневого підживлення запропоновано комбінований розпилювач (розділ 1.6), конструкція якого забезпечує стабілізацію потоку робочої рідини перед виходом із сопла та кероване формування струменів.

Вибір незалежних факторів чисельного експерименту здійснювався на основі аналізу конструкції комбінованого розпилювача, закономірностей течії рідини в сопловому вузлі та результатів попередніх теоретичних досліджень. До факторів включено лише ті параметри, які безпосередньо визначають процес формування факела розпилу та рівномірність її розподілу по поверхні обробки.

Зпершу розглянемо *комбінований розпилювач в струменевому режимі* (рис. 2.4).

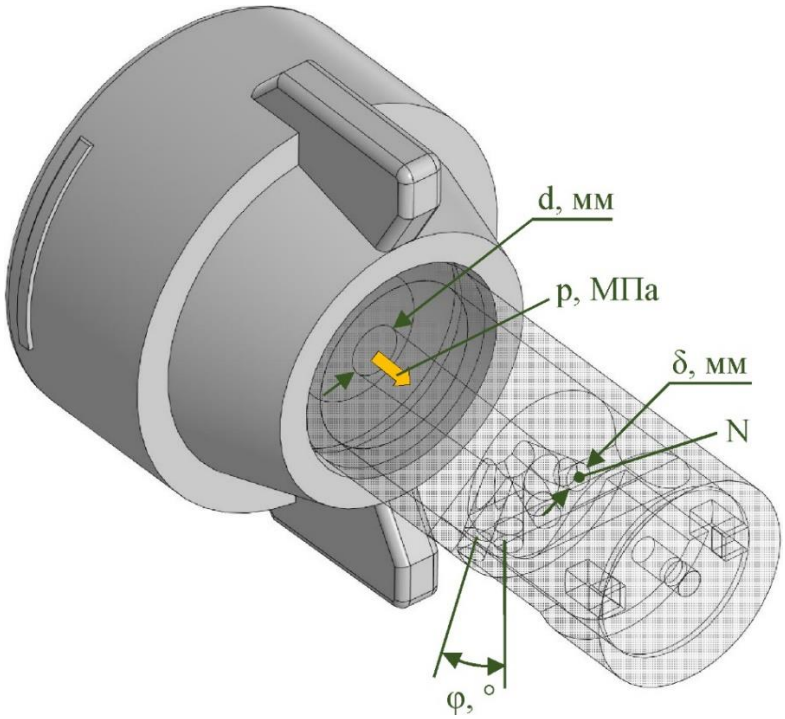


Рисунок 2.4 – 3D-модель комбінованого розпилювача в струменевому режимі

До *першої групи факторів* відносятся конструктивні параметри комбінованого розпилювача в струменевому режимі:

1. *Кут між струменевими отворами* φ характеризує просторову орієнтацію струменів та визначає геометрію факела розпилу. Зі збільшенням кута зростає ширина покриття, однак надмірне його значення погіршує перекриття окремих струменів і може збільшувати коефіцієнт варіації розподілу.

2. *Діаметр струменевих отворів* δ визначає площу прохідного перерізу соплового вузла. Від нього безпосередньо залежать витрата рідини, швидкість витікання та структура сформованого факела. Зі збільшенням діаметра зростає продуктивність розпилювача та середній діаметр крапель.

3. *Кількість струменевих отворів* N визначає число окремих струменів, що формують загальний факел. Збільшення кількості отворів забезпечує більш рівномірний розподіл рідини по ширині захвату, однак одночасно змінює витрату робочої рідини та характер взаємодії струменів між собою.

До *другої групи факторів* віднесемо режимні парметри комбінованого розпилювача в струменевому режимі:

1. *Робочий тиск* p визначає швидкість витікання рідини із сопла, кінетичну енергію струменя та інтенсивність його руйнування на краплі. Зі збільшенням тиску підвищуються витрата рідини та кут факела, проте одночасно зростає кількість дрібнодисперсних крапель, що призводить до знесення препарату.

2. *Висота встановлення штанги* h визначає умови взаємного перекриття факелів сусідніх розпилювачів. При недостатній висоті утворюються необроблені смуги, тоді як надмірне збільшення висоти спричиняє погіршення рівномірності покриття внаслідок впливу повітряних потоків та збільшення часу польоту крапель.

3. *Діаметр дроселя* d визначає гідравлічний опір соплового вузла і характер розподілу швидкостей у внутрішньому каналі розпилювача. Саме цей параметр забезпечує стабілізацію потоку перед входом у струменеві отвори та впливає на рівномірність витікання рідини через них.

З метою визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів струменевої частини комбінованого розпилювача було проведено попередній теоретичний аналіз процесу витікання рідини через струменеві отвори.

Витрата робочої рідини визначається рівнянням

$$Q = \mu A \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \tag{2.34}$$

де Q – витрата рідини, м³/с; μ – коефіцієнт витрати; А м сумарна площа струменевих отворів, м²; р – робочий тиск, Па; ρ – густина рідини, кг/м³.

Залежність показує, що найбільший вплив на продуктивність мають робочий тиск, діаметр струменевих отворів та їх кількість.

Швидкість витікання визначається рівнянням Торрічеллі

$$v = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}}. \tag{2.35}$$

При густині води ρ = 1000 кг/м^3 та коефіцієнті витрати μ = 0,95 одержуємо: при р = 0,20 МПа v = 19,0 м/с; при р = 0,25 МПа v = 21,2 м/с; при р = 0,30 МПа v = 23,3 м/с. Таким чином, діапазон 0,20–0,30 МПа забезпечує швидкість витікання 19–23 м/с, достатню для формування стійкого струменя без надмірного утворення дрібнодисперсних крапель, характерного для тисків понад 0,3–0,35 МПа.

Площа одного струменевого отвору визначається залежністю

$$A = \frac{\pi \delta^2}{4}. \tag{2.36}$$

При зміні діаметра отворів від 1 до 3 мм площа проходу змінюється від 0,785 до 7,07 мм², тобто майже у 9 разів, що забезпечує широкий діапазон зміни продуктивності розпилювача без зміни його конструктивної схеми.

Сумарна площа проходу струменевих отворів дорівнює

$$A_{\Sigma} = N \frac{\pi \delta^2}{4}. \tag{2.37}$$

При середньому діаметрі отворів 2 мм сумарна площа становить: для 3 отворів – 9,42 мм²; для 5 отворів – 15,70 мм²; для 7 отворів – 21,98 мм².

Отже, збільшення кількості струменевих отворів від 3 до 7 дозволяє змінювати продуктивність більш ніж у 2,3 раза, що є достатнім для дослідження впливу цього фактора на рівномірність покриття.

Діаметр дроселя визначає гідравлічний опір соплового вузла. Зі збільшенням його діаметра від 1 до 2 мм площа проходу зростає у 4 рази, що забезпечує істотну зміну швидкісного профілю потоку перед виходом із струменевих отворів. Менші значення призводять до надмірного падіння тиску, тоді як більші практично не забезпечують стабілізації потоку.

Кут між струменевими отворами визначає ширину формованого факела. Для попередньої оцінки використано геометричну залежність

$$B = 2h \tan\frac{\varphi}{2}, \tag{2.38}$$

де B – ширина покриття окремого струменя; h – висота встановлення штанги.

При середній висоті 0,7 м отримано: при $\varphi = 20°$ B = 0,247 м; при $\varphi = 25°$ B = 0,311 м; при $\varphi = 30°$ B = 0,375 м.

Таким чином, збільшення кута між струменями на 10° забезпечує збільшення ширини покриття приблизно на 52 %, що істотно впливає на рівномірність розподілу рідини.

Висота встановлення штанги безпосередньо визначає ступінь перекриття факелів сусідніх розпилювачів. При її зміні від 0,5 до 0,9 м ширина покриття окремого факела збільшується у 1,8 раза, що дозволяє дослідити вплив перекриття факелів на коефіцієнт варіації розподілу рідини.

На підставі виконаного аналізу як незалежні фактори чисельного експерименту прийнято: робочий тиск p = 0,20–0,30 МПа; висоту встановлення штанги h = 0,5–0,9 м; діаметр дроселя d = 1,0–2,0 мм; кут між струменевими отворами φ = 20–30°; діаметр струменевих отворів δ =1–3 мм; кількість струменевих отворів N = 3–7.

Обрані діапазони (таблиця 2.1) забезпечують достатню зміну гідродинамічних параметрів потоку: швидкість витікання змінюється від 19 до 23,3 м/с, площа одного струменевого отвору – майже у 9 разів, сумарна площа проходу – більш ніж у 2,3 раза, а ширина формованого факела – приблизно на 50 %. Таким чином, обрані фактори

безпосередньо характеризують як режими роботи розпилювача (тиск і висота штанги), так і конструктивні параметри струменевої частини (діаметр дроселя, діаметр та кількість струменевих отворів, кут між ними). Саме вони визначають три основні критерії ефективності роботи комбінованого розпилювача: коефіцієнт варіації розподілу робочої рідини; кут факела розпилу; витрату робочої рідини.

Таблиця 2.1 – Фактори та межі варіювання чисельного моделювання роботи комбінованого розпилювача в струменевому режимі

Позначення	Фактор	Рівень факторів			Інтервал варіювання Δ
		–1	0	+1	
Перша група факторів					
x_4	Кут між струменевими отворами φ, °	20	25	30	5
x_5	Діаметр струменевих отворів δ, мм	1	2	3	1
x_6	Кількість струменевих отворів N	3	5	7	2
Друга група факторів					
x_1	Тиск p, МПа	0,20	0,25	0,30	0,05
x_2	Висота штанги h, м	0,5	0,7	0,9	0,2
x_3	Діаметр дроселя d, мм	1,0	1,5	2,0	0,5

Дефлекторна частина комбінованого розпилювача призначена для формування плоского віялоподібного факела шляхом зміни напряму руху потоку робочої рідини на криволінійній дефлекторній поверхні (рис. 2.4). На відміну від струменевих розпилювачів, у яких диспергування відбувається переважно за рахунок взаємодії окремих струменів із навколишнім повітрям, у дефлекторних розпилювачах процес утворення крапель починається безпосередньо на поверхні дефлектора внаслідок перетворення суцільного струменя у тонку рідинну плівку.

Після виходу із каліброваного циліндричного каналу діаметром d робоча рідина, що подається під тиском p, набуває значної швидкості та потрапляє на криволінійну дефлекторну поверхню. При цьому кінетична енергія струменя частково переходить у поверхневу енергію рідинної плівки. У результаті відбувається її інтенсивне розтікання по дефлектору, виникнення хвильових нестійкостей, розвиток механізмів Кельвіна–Гельмгольца і Релея–Тейлора та подальший розрив плівки з утворенням дисперсного факела.

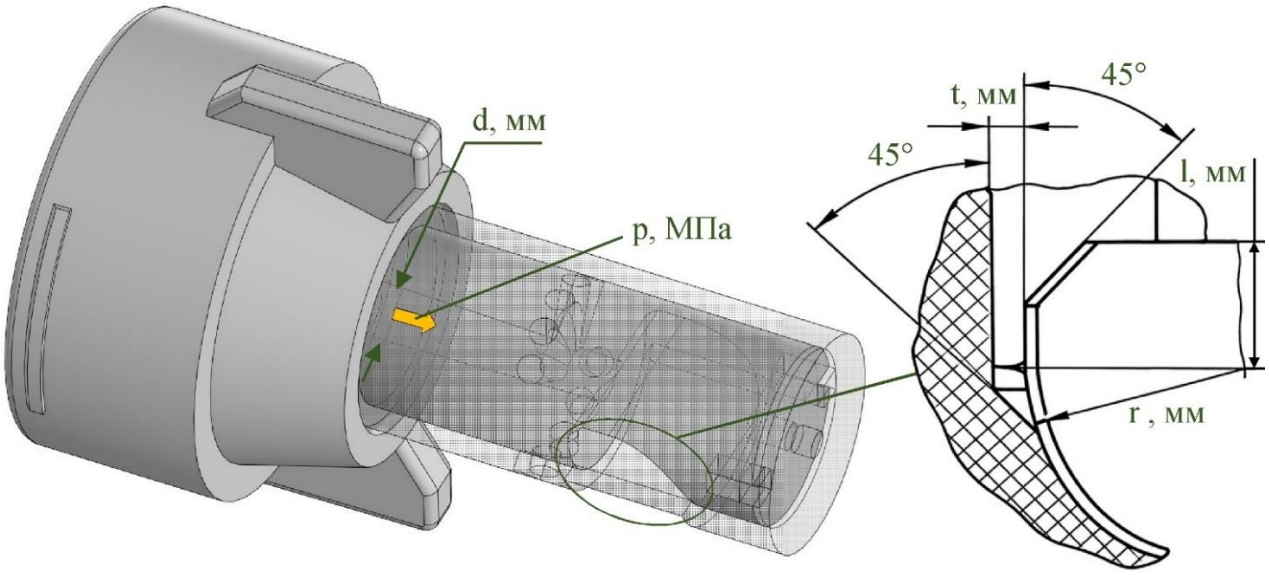


Рисунок 2.4 – 3D-модель комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі

Аналіз конструкції розпилювача (рис. 1.10), технічних характеристик серійних дефлекторних сопел (табл. 1.1), а також результатів попередніх досліджень показав, що найбільший вплив на характеристики факела розпилу мають шість конструктивно-технологічних параметрів, які прийнято як фактори чисельного експерименту (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Фактори та межі варіювання чисельного моделювання роботи комбінованого розпилювача в дефлектрному режимі

Позначення	Фактор	Рівень факторів			Інтервал варіювання Δ
		–1	0	+1	
Перша група факторів					
x_7	Відстань від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, мм	1,50	2,50	3,50	1,00
x_8	Радіус кривизни дефлекторної поверхні r, мм	1,50	4,00	6,50	2,50
x_9	Товщина крайки дефлектора t, мм	0,20	0,35	0,60	0,15
Друга група факторів					
x_1	Тиск p, МПа	0,20	0,25	0,30	0,05
x_2	Висота штанги h, м	0,50	0,70	0,90	0,20
x_3	Діаметр дроселя d, мм	1,00	1,50	2,00	0,50

До *першої групи факторів* відносятся конструктивні параметри комбінованого розпилювача в струменевому режимі:

1. *Відстань від вихідного каналу до центра кривизни дефлекторної поверхні* l визначає довжину вільного переміщення струменя до моменту контакту з дефлектором та положення точки його удару. Саме цей параметр визначає початковий напрямок розтікання рідинної плівки, величину локального тиску в зоні удару та інтенсивність перетворення кінетичної енергії струменя у поверхневу енергію плівки. При малих значеннях l струмінь практично відразу потрапляє на дефлектор, що супроводжується локальним збільшенням товщини плівки та нерівномірністю її розтікання. Надмірне збільшення l призводить до часткової втрати швидкості струменя ще до взаємодії з дефлектором, зменшення енергії удару та погіршення умов формування плоского факела. Аналіз існуючих конструкцій показує, що раціональний інтервал зміни параметра становить 1,5–3,5 мм.

2. *Радіус кривизни дефлекторної поверхні* r визначає траєкторію руху рідинної плівки після її взаємодії з дефлектором. При малих значеннях радіуса збільшується кривизна траєкторії руху рідини та відцентрове прискорення, що інтенсифікує розвиток поверхневих нестійкостей і прискорює руйнування плівки. Зі збільшенням радіуса кривизни процес розтікання стає плавнішим, однак інтенсивність диспергування зменшується, а середній діаметр крапель зростає. Для серійних розпилювачів величина r знаходиться в межах 1,5–6,5 мм, що забезпечує широкий діапазон характеристик сформованого факела.

3. *Товщина крайки дефлектора* t визначає умови відриву рідинної плівки від поверхні дефлектора. При малих значеннях t відрив плівки відбувається раніше, що сприяє формуванню більш дрібнодисперсного факела та збільшенню кута його розкриття. Зі збільшенням товщини крайки момент відриву зміщується, збільшується товщина рідинної плівки та середній діаметр крапель, що може призводити до погіршення рівномірності розподілу рідини. Водночас надто мала товщина крайки знижує її механічну міцність і технологічність виготовлення. З урахуванням конструкцій серійних дефлекторних сопел раціональним прийнято інтервал 0,20–0,60 мм.

До *другої групи факторів* віднесено режимні параметри роботи комбінованого розпилювача у струменевому режимі: *робочий тиск p*, *діаметр каліброваного каналу (дроселя) d* та *висоту розташування штанги h*. Дослідження цих факторів проводили в тих самих діапазонах, що й під час експериментального дослідження комбінованого розпилювача у струменевому режимі. Вибір зазначених факторів зумовлений їх безпосереднім впливом на витрату робочої рідини, швидкість її витікання, кінетичну енергію струменя, а також геометричні та інтенсивнісні характеристики сформованого факела. При цьому висота h визначає умови розвитку струменів після виходу з розпилювача та параметри їх розподілу на контрольній поверхні.

Таким чином, як незалежні фактори чисельного експерименту обрано робочий тиск p, висоту штанги h, діаметр каліброваного каналу d, відстань від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, радіус кривизни дефлекторної поверхні r та товщину крайки дефлектора t. Сукупність зазначених параметрів найбільш повно характеризує процес трансформації потоку робочої рідини в дефлекторній частині комбінованого розпилювача та дозволяє встановити їх вплив на формування рідинної плівки, кут розкриття факела, дисперсний склад крапель, рівномірність розподілу рідини та ефективність внесення рідких мінеральних добрив.

2.4 Результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі

Для оцінювання характеру формування факела та впливу конструктивних і режимних параметрів комбінованого розпилювача проведено чисельне моделювання процесу витікання та диспергування робочої рідини у струменевому режимі. Моделювання виконували з урахуванням геометричних параметрів соплового вузла, робочого тиску та просторового положення розпилювача. Розрахункова область включала внутрішній об’єм розпилювача та зовнішню область формування факела до цільової поверхні.

Схему розрахункової області, геометрію струменевих отворів, напрямки витікання рідини та основні параметри моделі наведено на рис. 2.5. Для оцінювання

процесу диспергування застосовано удосконалену модель ELSA, яка забезпечує опис переходу суцільної рідкої фази у дисперсний потік. Особливістю реалізованого підходу є представлення сформованої дисперсної фази у вигляді дискретних DEM-частинок, параметри яких характеризують розмір, масу, швидкість та просторове положення елементів розпиленого потоку. Такий підхід дає змогу безпосередньо аналізувати просторову структуру факела та характер розподілу дисперсної фази в розрахунковій області.

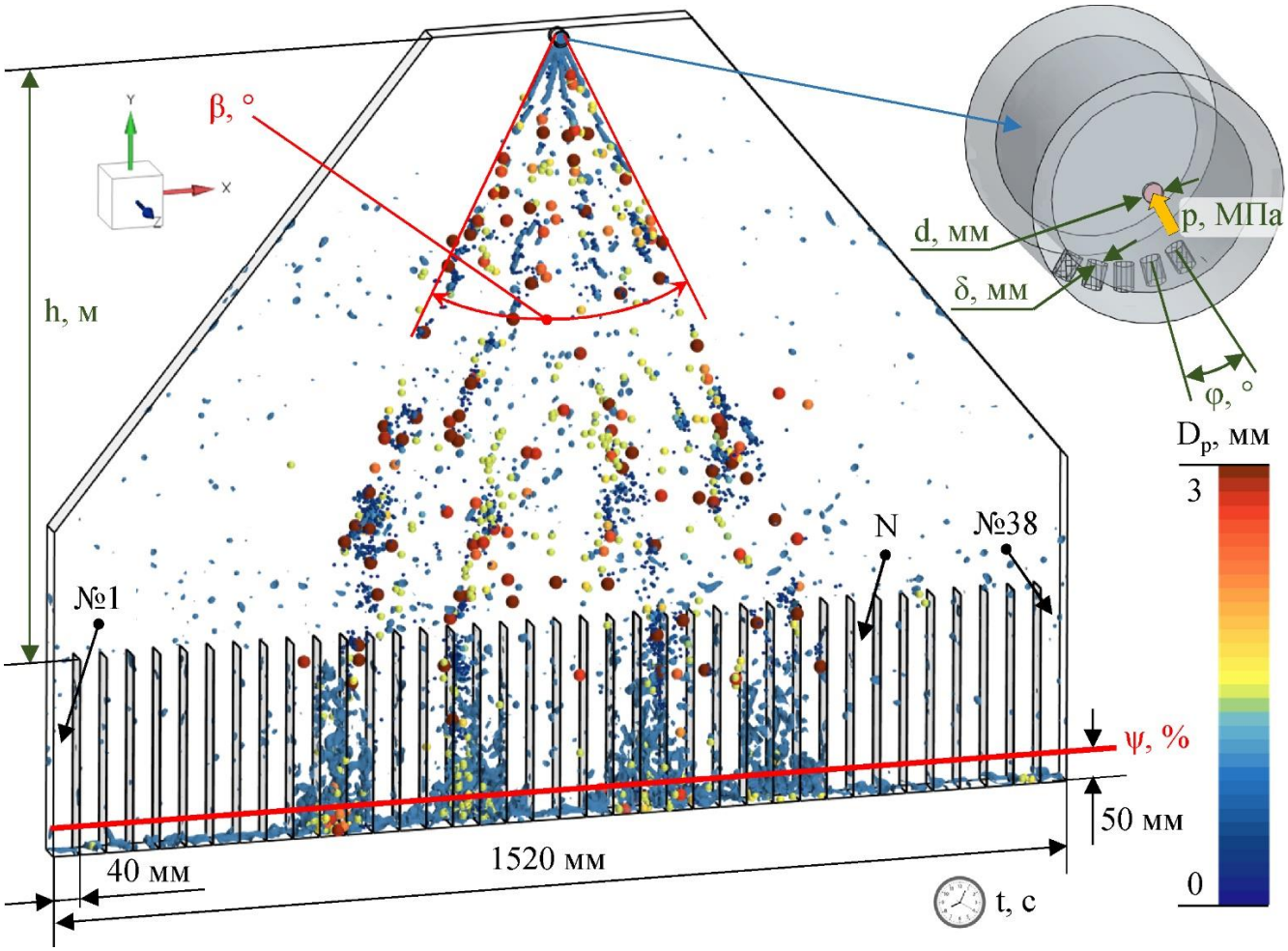


Рисунок 2.5 – Схема чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі

Як видно з рис. 2.5, після проходження робочої рідини через калібровані струменеві отвори формуються окремі початкові струмені, які розходяться у просторі відповідно до їхнього взаємного кутового положення. У міру віддалення від

соплового вузла окремі струмені втрачають початкову компактність, а під дією процесів диспергування формують просторово розподілений потік дискретних частинок. При цьому характер розширення факела визначається як геометрією соплового вузла, так і енергетичними параметрами потоку.

Векторне поле швидкостей у зоні формування факела наведено на рис. 2.5. Розподіл векторів свідчить про збереження високої швидкості потоку безпосередньо біля струменевих отворів із її подальшим зменшенням у міру віддалення від розпилювача. Одночасно спостерігається поступове розходження окремих потоків та формування загального факела. Найбільша концентрація дискретних DEM-частинок спостерігається вздовж основних напрямків витікання, визначених положенням струменевих отворів.

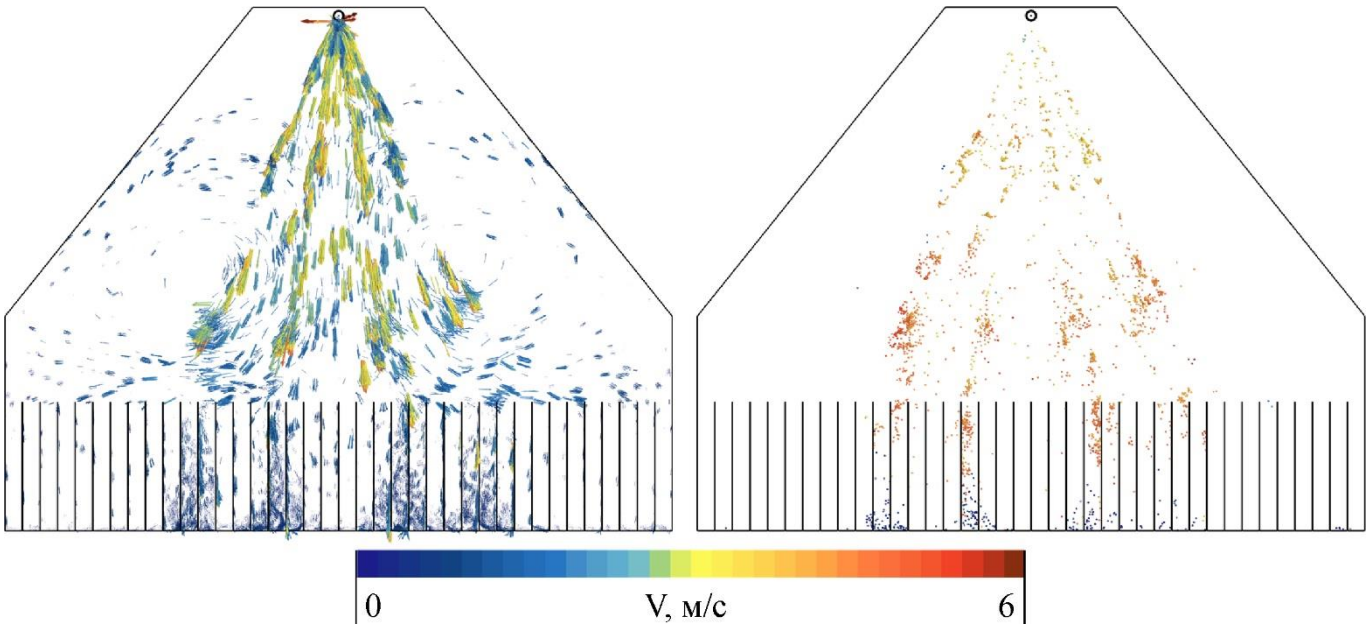


Рисунок 2.5 – Векторне поле розподілу швидкостей рідини в області факела комбінованого розпилювача в струменевому режимі

Аналіз траєкторій DEM-частинок показує, що зі збільшенням відстані від соплового вузла відбувається просторове розширення потоку та формування характерної зони розпилення. При цьому дисперсна фаза не утворює однорідної суцільної області, а характеризується локальними зонами підвищеної концентрації частинок, що відповідають напрямкам первинних струменів. Така структура факела є

характерною для струменевого режиму роботи та безпосередньо визначає подальший розподіл робочої рідини по цільовій поверхні.

Особливе значення має збереження напрямленості потоку на початковій ділянці факела. DEM-моделювання показує, що основна частина дискретної фази переміщується в межах сформованої зони розпилення, тоді як окремі частинки, переважно за периферією факела, мають більші відхилення від основного напрямку руху. Це дає змогу оцінити не лише загальний кут розкриття факела, а й характер просторового розподілу дисперсної фази.

Для перевірки достовірності чисельної моделі проведено порівняння результатів моделювання з експериментальними дослідженнями. На рис. 2.6 наведено зіставлення просторової структури факела, отриманої чисельним та експериментальним шляхом (розділ 4). У чисельному експерименті розподіл DEM-частинок відображає основні області концентрації дисперсної фази, тоді як експериментальна картина характеризує фактичне формування потоку робочої рідини.

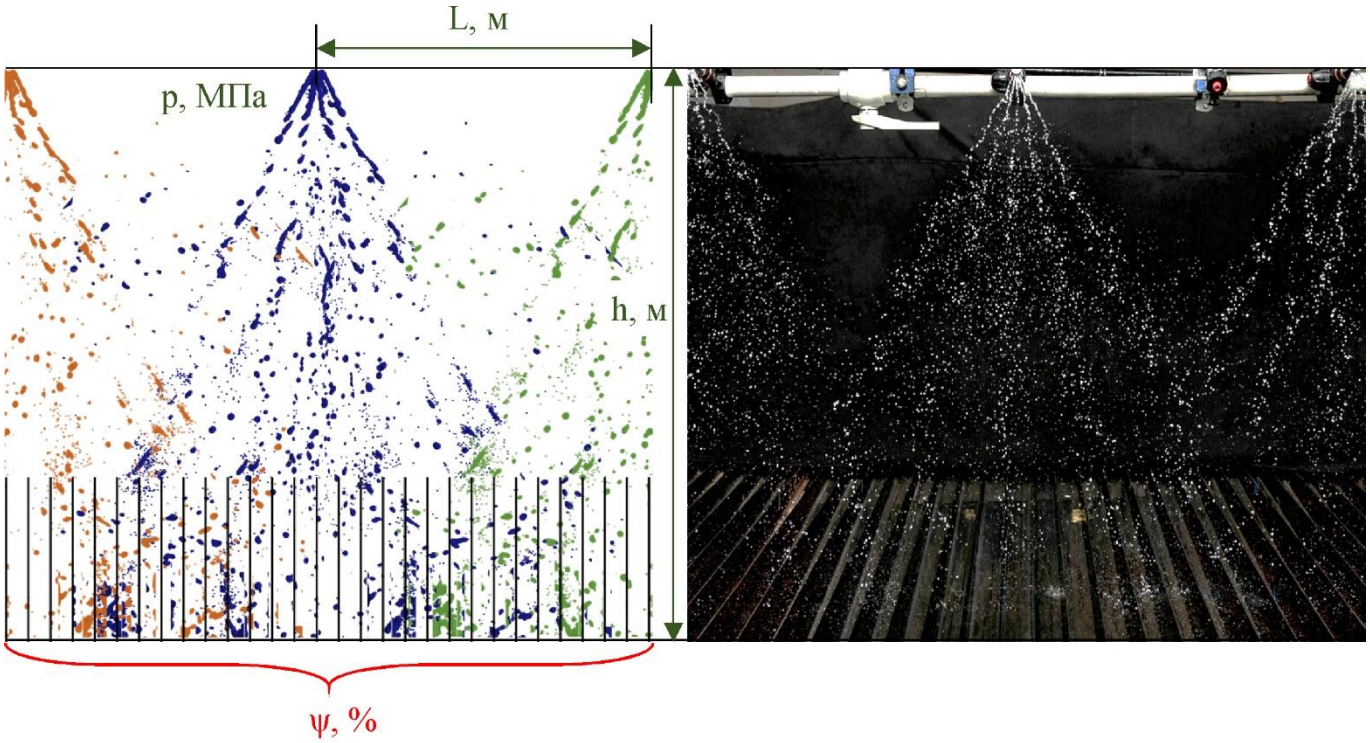


Рисунок 2.6 – Візуальне порівняння результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень комбінованого розпилювача в струменевому режимі

Як видно з рис. 2.6, чисельна модель відтворює основні закономірності формування факела, зокрема його загальну геометрію, напрямки розвитку окремих струменів, область їх просторового розходження та характер розподілу дисперсної фази по ширині факела. Просторове положення основних зон концентрації DEM-частинок загалом відповідає зонам найбільшої інтенсивності осадження робочої рідини, визначеним експериментально.

Водночас між чисельною та експериментальною картинами спостерігаються локальні відмінності, що можуть бути зумовлені спрощеннями розрахункової моделі, дискретизацією потоку DEM-частинками, а також відмінностями між ідеалізованими умовами чисельного експерименту та реальними умовами лабораторних випробувань. Проте ці відмінності не змінюють загального характеру залежностей і не порушують відповідності між основними зонами формування факела.

Таким чином, результати чисельного моделювання підтверджують можливість використання удосконаленої моделі ELSA з представленням сформованої дисперсної фази дискретними DEM-частинками для дослідження комбінованого розпилювача в струменевому режимі. Отримана модель дає змогу оцінювати просторову структуру факела, характер розходження струменів, розподіл швидкостей та концентрацію дисперсної фази, а також встановлювати вплив конструктивних і режимних параметрів розпилювача на якість формування факела.

Усі результати чисельного моделювання зведено в таблицю додатка В. Статистичну обробку отриманих даних проводили в середовищі програмного пакету Wolfram Cloud, що дозволило отримати рівняння регресії другого порядку, які описують залежність критеріїв оцінювання процесу розпилення від досліджуваних факторів у закодованому вигляді для двох груп факторів:

– для коефіцієнту варіації інтенсивності факела ψ

$$\psi = 19,574 - 0,917x_4 + 5,328x_4^2 - 3,861x_5 - 1,067x_4x_5 + 13,428x_5^2 + \\ +3,76x_6 + 0,0417x_4x_6 - 0,333x_5x_6 + 2,86x_6^2, \quad (2.39)$$

$$\psi = 25,37 - 0,678x_1 + 1,22x_1^2 - 6,86x_2 - 0,567x_1x_2 - 1,11x_2^2 + \\ +3,694x_3 + 0,075x_1x_3 - 0,808x_2x_3 + 3,006x_3^2, \quad (2.40)$$

– для куту розкриття факела β

$$\beta = 96,78 + 12,767x_4 - 1,8x_4^2 + 4,55x_5 + 0,599x_4x_5 - 0,5167x_5^2 + 24,34x_6 + \\ + 3,325x_4x_6 + 0,275x_5x_6 - 2,2167x_6^2, \quad (2.41)$$

де x – закодовані значення факторів згідно таблиці 2.1.

Результати статистичної обробки рівнянь (2.39)–(2.41) в програмному пакеті Wolfram Cloud наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.39)–(2.41)

Показник	(2.39)	(2.40)	(2.41)
SS моделі	3303,92	2152,41	25149,10
MS моделі	3303,92	2152,41	25149,10
SS похибки	21,1688	14,6102	13,7561
MS похибки	1,24522	0,859423	0,809183
$F_{розр}$	2653,28	2504,48	31079,62
$F_{табл}$ ($\alpha = 0,05$)	2,54	2,54	2,54
Адекватність моделі	Так	Так	Так
Максимальний p-value коефіцієнтів	0,8986	0,7827	0,3044
Кількість статистично значущих коефіцієнтів	8 із 10	9 із 10	8 із 10
$t_{табл}$ ($\alpha = 0,05$)	2,11	2,11	2,11
$t_{розр}$ (a_{00})	211,293	53,7473	34,4501
$t_{розр}$ (a_{10}, a_{40})	60,213	–3,10185	–3,48517
$t_{розр}$ (a_{20}, a_{50})	21,4597	–31,3744	–14,68
$t_{розр}$ (a_{30}, a_{60})	114,793	16,9076	14,2998
$t_{розр}$ (a_{12}, a_{45})	2,31057	–2,11746	–3,31128
$t_{розр}$ (a_{13}, a_{46})	12,8044	0,280252	0,129347
$t_{розр}$ (a_{23}, a_{56})	1,05901	–3,02049	–1,03477
$t_{розр}$ (a_{11}, a_{44})	–4,90145	3,2294	11,6949
$t_{розр}$ (a_{22}, a_{55})	–1,4069	–2,93582	29,4752
$t_{розр}$ (a_{33}, a_{66})	–6,03605	7,9414	6,28039

Адекватність отриманих математичних моделей перевіряли за критерієм Фішера F, а статистичну значущість окремих коефіцієнтів регресії – за критерієм Стьюдента t. Коефіцієнти, статистична значущість яких не підтверджена, виключали з відповідних рівнянь регресії. Це дозволило сформувати спрощені математичні моделі, які містять лише статистично значущі фактори та їх взаємодії:

– для коефіцієнту варіації інтенсивності факела ψ (рис. 2.7):

$$\psi = 216,597 - 5,272\mathrm{N} + 0,71528\mathrm{N}^2 - 52,239\delta + \\ +13,428\delta^2 - 10,412\varphi - 0,213\delta\varphi + 0,213\varphi^2, \quad (2.42)$$

$$\psi = 67,261 - 23,019d + 12,022d^2 + 30,9028h - \\ -8,0833dh - 27,78h^2 - 218,33p - 56,67hp + 488,89p^2, \quad (2.43)$$

– для кута розкриття факела β (рис. 2.8):

$$\beta = -48,29 + 9,3986\mathrm{N} - 0,55417\mathrm{N}^2 + 1,55\delta + \\ +4,251\varphi + 0,3325\mathrm{N}\varphi + 0,119\delta\varphi - 0,072\varphi^2. \quad (2.44)$$

Аналіз рівняння (2.42) показує, що на рівномірність інтенсивності факела найбільш істотно впливають діаметр струменевих отворів δ та кут між струменевими отворами φ, тоді як вплив кількості отворів N має менш виражений характер.

Збільшення кількості струменевих отворів N спочатку сприяє зниженню коефіцієнта варіації, про що свідчить від'ємний лінійний коефіцієнт −5,272N. Фізично це пояснюється збільшенням кількості окремих струменів, які формують факел, та відповідним зменшенням дискретності розподілу рідини. Проте додатний квадратичний член 0,71528N2 вказує, що подальше збільшення кількості отворів не забезпечує необмеженого підвищення рівномірності. За надмірної кількості струменів зменшується відстань між ними, посилюється взаємний вплив струменів і може виникати нерівномірне перекриття окремих зон факела.

Діаметр отворів δ характеризується відносно сильним від'ємним лінійним та додатним квадратичним ефектами. Це означає, що зі збільшенням діаметра отвору коефіцієнт варіації спочатку зменшується, досягаючи певної області мінімуму, після чого починає зростати. Така залежність фізично пов'язана зі зміною витрати через окремий отвір, швидкості витікання та співвідношення між енергією струменя і його поперечним розсіюванням. За малого діаметра струмені мають недостатню інтенсивність і можуть формувати локалізовані зони осадження. Зі збільшенням δ забезпечується більш інтенсивне формування факела, однак надмірне збільшення діаметра призводить до укрупнення струменів і погіршення рівномірності їх просторового розподілу.

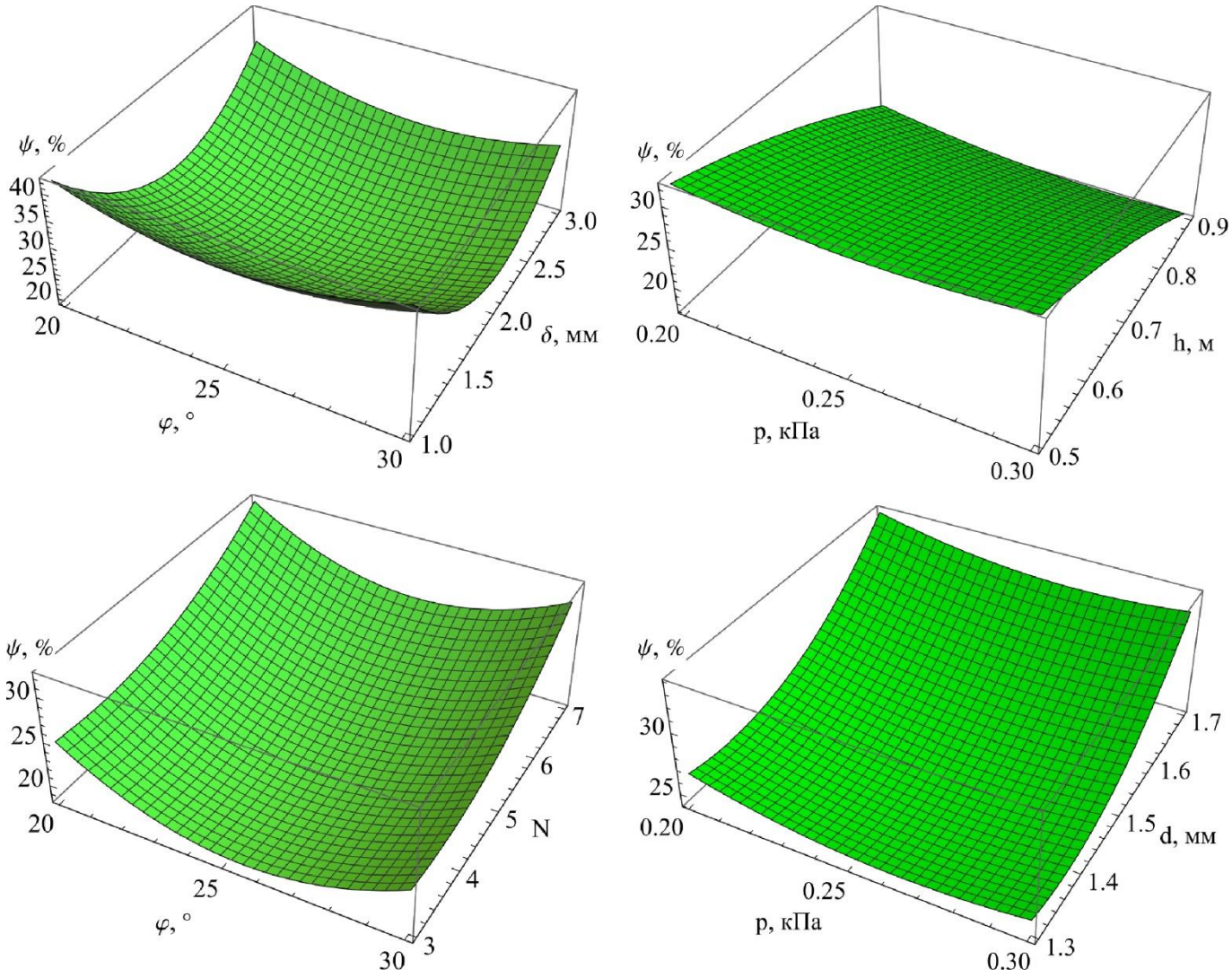


Рисунок 2.7 – Залежність коефіцієнту варіації інтенсивності факела ψ від кута між струменевими отворами φ, діаметра струменевих отворів δ, кількості струменевих отворів N, тиску p, висоти штанги h, діаметра дроселя d

Вплив кута φ також має нелінійний характер. Від'ємний лінійний коефіцієнт −10,412φ свідчить про тенденцію до зниження коефіцієнта варіації зі збільшенням кута між отворами, тоді як додатний квадратичний член $0{,}213\varphi^2$ обмежує цей ефект. Фізично збільшення кута сприяє рознесенню окремих струменів у просторі та формуванню ширшого факела. Водночас надмірне збільшення кута може призвести до збільшення відстаней між окремими струменями та появи зон недостатньої інтенсивності між ними.

Особливий інтерес становить взаємодія δφ. Наявність цього члена свідчить, що оптимальний діаметр отвору не може розглядатися незалежно від кута їх

розташування. Зі зміною φ змінюється просторова відстань між струменями, а тому однаковий діаметр отворів може забезпечувати різну рівномірність факела залежно від їх взаємного розташування.

Таким чином, рівняння (2.42) підтверджує, що для забезпечення мінімального коефіцієнта варіації необхідно здійснювати комплексний вибір кількості та діаметра струменевих отворів і кута між ними, а не оптимізувати кожний параметр окремо.

Рівняння (2.43) характеризує вплив діаметра дроселя d, висоти штанги h та робочого тиску p на коефіцієнт варіації інтенсивності факела.

Найбільш виражений нелінійний ефект спостерігається для робочого тиску. Від'ємний лінійний коефіцієнт −218,33p у поєднанні з великим додатним квадратичним коефіцієнтом 488,89p2 свідчить про наявність чітко вираженої області мінімуму ψ. Фізично це відповідає тому, що підвищення тиску спочатку збільшує швидкість витікання рідини та інтенсивність диспергування струменів, сприяючи формуванню більш однорідного факела. Проте подальше підвищення тиску може спричиняти надмірне подрібнення потоку, збільшення частки дрібнодисперсної фракції та посилення просторової нестабільності факела.

Діаметр дроселя має аналогічну, хоча менш виражену, нелінійну залежність. Від'ємний коефіцієнт при d та додатний коефіцієнт при d2 означають існування раціонального діаметра дросельного каналу. При недостатньому діаметрі дроселя виникає значний гідравлічний опір, який обмежує витрату рідини та енергію струменя. Зі збільшенням діаметра умови витікання покращуються, однак надмірне збільшення каналу зменшує ефект дроселювання і може призводити до формування більш концентрованого струменя.

Висота штанги h також має нелінійний характер впливу. Від'ємний квадратичний член −27,78h2 свідчить про існування області, у якій зміна висоти сприяє покращенню рівномірності. Збільшення висоти штанги збільшує відстань, на якій окремі струмені розсіюються та взаємодіють із навколишнім повітрям. Це може сприяти просторовому вирівнюванню інтенсивності. Однак надмірне збільшення висоти, навпаки, може посилити розсіювання та нестабільність факела.

Суттєвим є також взаємний член hp. Він показує, що вплив робочого тиску залежить від висоти штанги. Зі збільшенням тиску змінюються швидкість та дальність польоту струменів, тому оптимальна висота розташування штанги повинна визначатися одночасно з режимом роботи розпилювача.

Отже, рівняння (2.43) демонструє, що рівномірність факела визначається не окремим значенням тиску, висоти або діаметра дроселя, а їх узгодженим поєднанням. Особливо важливим є правильний вибір робочого тиску та діаметра дроселя, оскільки саме вони визначають початкову енергію та інтенсивність формування струменів.

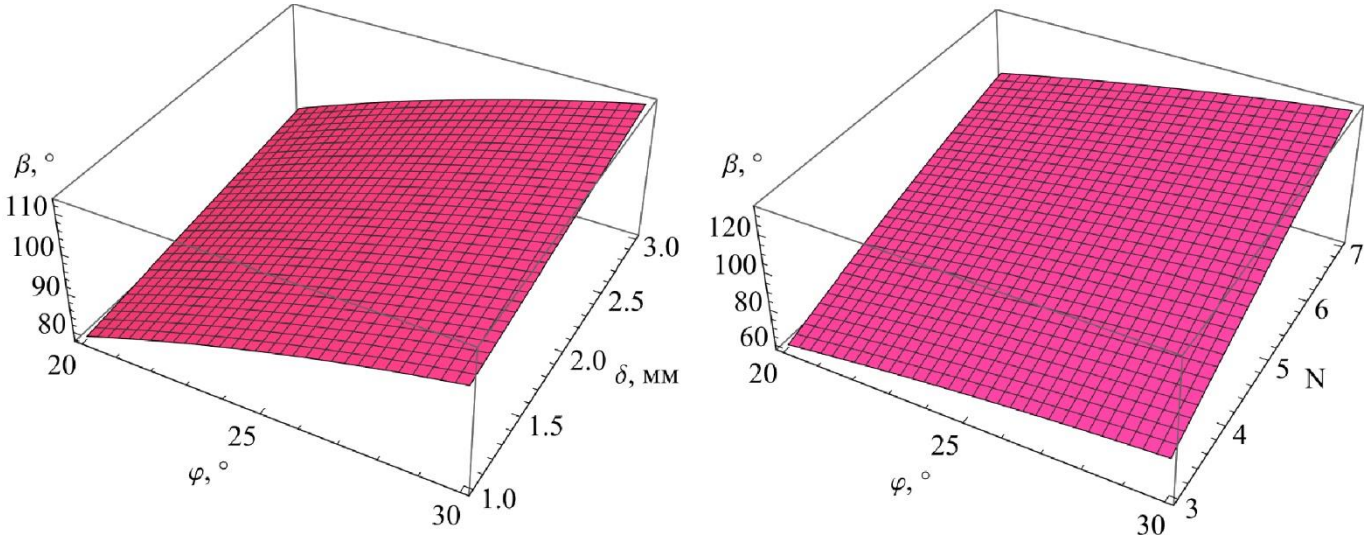


Рисунок 2.8 – Залежність кута розкриття факела β від кута між струменевими отворами φ, діаметра струменевих отворів δ, кількості струменевих отворів N

На відміну від коефіцієнта варіації, для кута розкриття факела більше значення β (2.44) є бажаним, оскільки збільшення кута забезпечує формування ширшої зони розподілу рідини.

Збільшення кількості струменевих отворів N спочатку призводить до збільшення кута розкриття факела. Це підтверджується додатним лінійним коефіцієнтом 9,3986N. При цьому від'ємний квадратичний член $-0{,}55417N^2$ свідчить про поступове зниження ефекту від подальшого збільшення кількості отворів. Фізично це можна пояснити тим, що після досягнення певної кількості струменів додавання нових отворів уже не забезпечує пропорційного розширення факела.

Діаметр отворів має додатний коефіцієнт 1,55δ, тобто збільшення δ сприяє збільшенню кута розкриття факела. Більший діаметр забезпечує більшу витрату через окремий канал і формування більш інтенсивного струменя, здатного поширюватися на більшу відстань у поперечному напрямку.

Найбільш безпосередній вплив на геометричне розкриття факела має кут між струменевими отворами φ. Додатний коефіцієнт 4,251φ свідчить, що збільшення кута між сусідніми отворами безпосередньо розширює просторову конфігурацію факела. Водночас від'ємний квадратичний член $-0{,}072\varphi^2$ показує, що цей ефект має межу: надмірне рознесення струменів може призвести до втрати суцільності факела та появи значних проміжків між окремими струменями.

Важливим є додатний коефіцієнт взаємодії $N\varphi = 0{,}3325$. Це означає, що збільшення кута між отворами є ефективнішим за більшої кількості струменів. Отже, геометричні параметри соплового вузла взаємопов'язані: кількість струменів визначає дискретність факела, а кут між ними – його просторове розкриття.

Таким чином, результати чисельного моделювання свідчать про наявність нелінійного та взаємопов'язаного впливу конструктивних і режимних параметрів струменевого розпилювача. Для забезпечення високої якості розпилення необхідно одночасно враховувати два взаємопов'язані критерії: мінімізацію коефіцієнта варіації інтенсивності факела ψ та максимізацію кута його розкриття β.

Рівняння (2.42) і (2.43) показують, що мінімальні значення ψ досягаються не на крайніх значеннях факторів, а в певній області їх раціонального поєднання. Водночас рівняння (2.44) свідчить, що збільшення кількості струменів, їх діаметра та кута між ними загалом сприяє розширенню факела, однак надмірне збільшення цих параметрів обмежується квадратичними ефектами.

Це узгоджується з фізичною сутністю процесу: конструкція соплового вузла повинна забезпечувати достатнє просторове розкриття факела без утворення зон надмірної та недостатньої інтенсивності. Саме тому отримані залежності доцільно використовувати для визначення компромісної області параметрів, у якій одночасно забезпечуються мінімальний коефіцієнт варіації інтенсивності та достатньо великий кут розкриття факела.

За результатами багатокритеріальної оптимізації конструктивних параметрів струменевого вузла за критерієм мінімізації відношення коефіцієнта варіації інтенсивності факела до кута його розкриття встановлено раціональні значення досліджуваних факторів. Розрахункові значення становили: кут між струменевими отворами $\varphi = 26{,}63°$, діаметр струменевого отвору $\delta = 2{,}19$ мм та кількість отворів $N = 5{,}3$. З урахуванням дискретного характеру параметра N для практичної реалізації прийнято $N = 5$. Таким чином, раціональними конструктивними параметрами струменевого вузла є $\varphi = 26{,}6°$, $\delta = 2{,}2$ мм та $N = 5$. Отримане поєднання параметрів забезпечує компроміс між рівномірністю інтенсивності факела та його просторовим розкриттям і прийняте як базове для подальшого чисельного та експериментального дослідження.

2.5 Результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі

Наступним етапом досліджень було проведено чисельне моделювання роботи розробленого комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі, за якого робоча рідина після проходження каліброваного дросельного каналу спрямовується на поверхню дефлектора та під дією кінетичної енергії потоку диспергується з формуванням розгорнутого факела розпилу.

Метою чисельного дослідження було встановлення особливостей формування рідинного факела, оцінювання просторового розподілу швидкостей та інтенсивності руху дисперсної фази, а також перевірка адекватності розробленої чисельної моделі шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

Чисельна модель відтворювала конструктивну геометрію комбінованого розпилювача, включаючи корпус, калібрований дросельний канал та дефлекторну поверхню. Особливістю моделювання було використання дисперсної фази у вигляді DEM-частинок, які формуються в результаті розпаду рідинного потоку. Такий підхід відповідає удосконаленій моделі ELSA (Eulerian–Lagrangian Spray Atomization), у якій процес первинного розпилення описується з переходом від суцільної рідинної фази

до дискретного представлення сформованих крапель. Тому отримана сукупність DEM-частинок характеризує просторову структуру дисперсного факела та дає змогу оцінювати не лише напрямок його поширення, а й інтенсивність розподілу рідинної фази в робочій області.

Схему розрахункової області, геометрію розпилювача та основні параметри, що використовувалися під час чисельного експерименту, наведено на рис. 2.9. Розрахункова область сформована таким чином, щоб забезпечити вільний розвиток факела після виходу робочої рідини з розпилювача та її подальше осадження на контрольній поверхні. Висота розташування контрольної поверхні відповідала умовам експериментального дослідження, що забезпечило можливість безпосереднього зіставлення результатів чисельного та натурного експериментів.

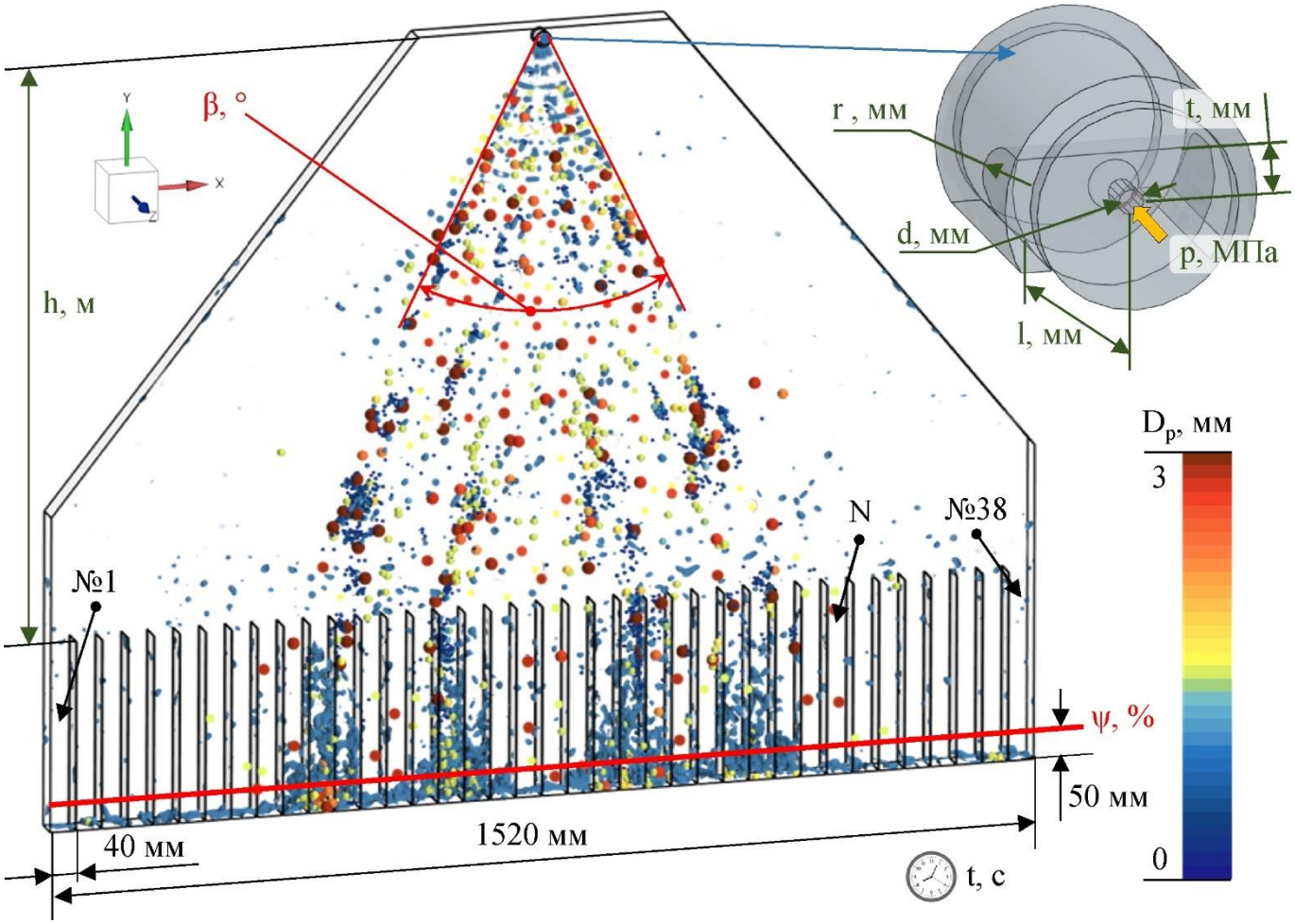


Рисунок 2.9 – Схема чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі

Аналіз результатів чисельного моделювання показує, що після виходу рідини з каліброваного каналу відбувається її взаємодія з поверхнею дефлектора, внаслідок чого початковий компактний потік трансформується у розгорнутий дисперсний факел. При цьому швидкість рідини перерозподіляється у напрямках, визначених геометрією робочої поверхні дефлектора. Формування окремих DEM-частинок відбувається переважно в зоні контакту потоку з дефлектором та безпосередньо після нього.

Векторне поле швидкостей, представлене на рис. 2.10, характеризує просторову трансформацію потоку після його взаємодії з дефлектором. У центральній частині факела спостерігаються найбільш інтенсивні потоки, тоді як у міру віддалення від зони первинного розпаду швидкість дисперсної фази зменшується. Одночасно відбувається розширення факела у поперечному напрямку та формування зони розподілу крапель, яка визначає площу потенційного покриття цільової поверхні.

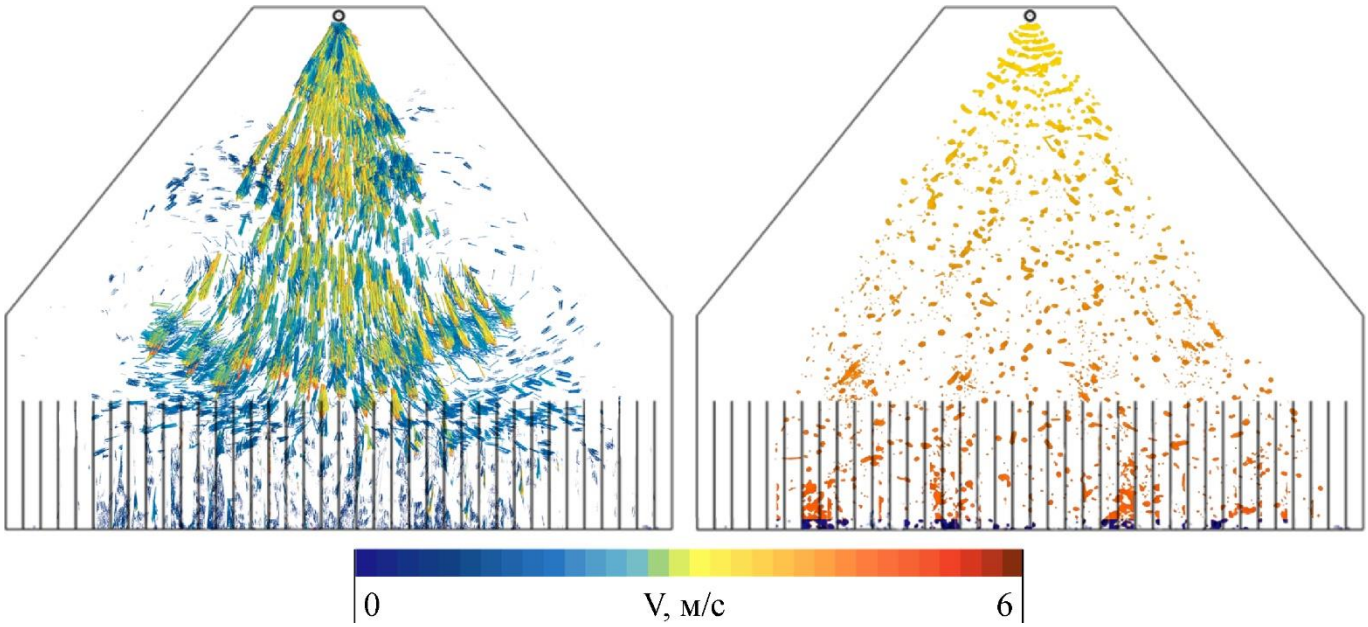


Рисунок 2.10 – Векторне поле розподілу швидкостей рідини в області факела комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі

Для кількісної оцінки сформованого факела результати чисельного моделювання аналізувалися на контрольній поверхні, розташованій на заданій висоті відносно розпилювача. Розподіл DEM-частинок на цій поверхні використовувався

для визначення просторової структури факела та оцінювання рівномірності інтенсивності осадження. Такий спосіб аналізу забезпечує безпосередню відповідність між чисельним експериментом і лабораторними дослідженнями, у яких розподіл робочої рідини визначався за її осадженням на контрольній поверхні.

Порівняння отриманого чисельного факела з результатами експериментальних досліджень наведено на рис. 2.11. Візуальне зіставлення свідчить про відповідність загальної структури факела, його геометричних меж та характеру просторового розподілу дисперсної фази. Чисельна модель відтворює характерне розширення потоку після взаємодії з дефлектором і концентрацію основної маси частинок у межах сформованого факела.

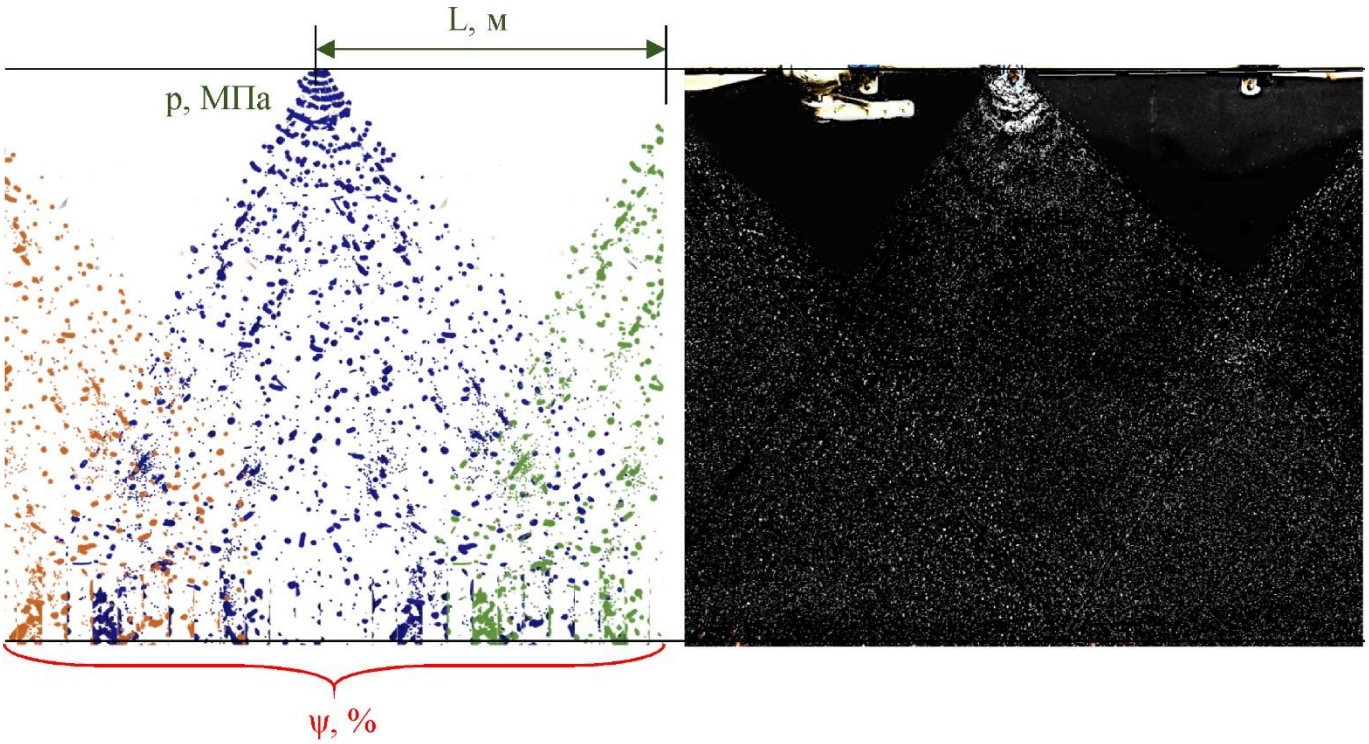


Рисунок 2.11 – Візуальне порівняння результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі

Усі результати чисельного моделювання зведено в таблицю додатка Г. Статистичну обробку отриманих даних проводили в середовищі програмного пакету

Wolfram Cloud, що дозволило отримати рівняння регресії другого порядку, які описують залежність критеріїв оцінювання процесу розпилення від досліджуваних факторів у закодованому вигляді для двох груп факторів:

– для коефіцієнту варіації інтенсивності факела ψ

$$\begin{gathered}\psi = 27{,}11 - 5{,}16\mathrm{x}_7 + 3{,}006\mathrm{x}_7^2 - 5{,}35\mathrm{x}_8 + 0{,}49\mathrm{x}_7\mathrm{x}_8 + \\ +3{,}439\mathrm{x}_8^2 - 11{,}88\mathrm{x}_9 - 1{,}98\cdot 10^{-15}\mathrm{x}_7\mathrm{x}_9 - 6{,}075\cdot 10^{-15}\mathrm{x}_8\mathrm{x}_9 + 4{,}93\mathrm{x}_9^2,\end{gathered} \tag{2.45}$$

$$\begin{gathered}\psi = 12{,}48 - 1{,}07\mathrm{x}_1 - 0{,}31\mathrm{x}_1^2 - 1{,}883\mathrm{x}_2 + 1{,}233\mathrm{x}_1\mathrm{x}_2 + \\ +0{,}439\mathrm{x}_2^2 + 0{,}217\mathrm{x}_3 + 0{,}783\mathrm{x}_1\mathrm{x}_3 + 0{,}4167\mathrm{x}_2\mathrm{x}_3 + 0{,}0056\mathrm{x}_3^2,\end{gathered} \tag{2.46}$$

– для куту розкриття факела β

$$\begin{gathered}\beta = 117{,}89 + 10{,}3x_7 - 7{,}01x_7^2 + 11{,}6x_8 + 1{,}25x_7x_8 - 8{,}74x_8^2 + \\ +9{,}7x_9 - 1{,}2\cdot 10^{-14}x_7x_9 - 8{,}83\cdot 10^{-15}x_8x_9 - 4{,}1x_9^2,\end{gathered} \tag{2.47}$$

де x – закодовані значення факторів згідно таблиці 2.2.

Результати статистичної обробки рівнянь (2.39)–(2.41) в програмному пакеті Wolfram Cloud наведено в таблиці 2.4.

Адекватність отриманих математичних моделей перевіряли за критерієм Фішера F, а статистичну значущість окремих коефіцієнтів регресії – за критерієм Стьюдента t. Коефіцієнти, статистична значущість яких не підтверджена, виключали з відповідних рівнянь регресії. Це дозволило сформувати спрощені математичні моделі, які містять лише статистично значущі фактори та їх взаємодії:

– для коефіцієнту варіації інтенсивності факела ψ (рис. 2.12):

$$\begin{gathered}\psi = 132{,}783 - 20{,}98l + 3{,}006l^2 - 7{,}042r + \\ +0{,}19lr + 0{,}55r^2 - 232{,}88t + 219{,}51t^2,\end{gathered} \tag{2.48}$$

$$\begin{gathered}\psi = 82{,}276 - 25{,}792d - 71{,}236h + 10{,}42dh + \\ +10{,}972h^2 - 162{,}94p + 78{,}33dp + 123{,}33hp - 12{,}44p^2,\end{gathered} \tag{2.49}$$

– для кута розкриття факела β (рис. 2.13):

$$\begin{gathered}\beta = -32{,}45 + 43{,}35l - 7{,}011l^2 + 14{,}583r + \\ +0{,}49lr - 1{,}399r^2 + 191{,}53t - 181{,}23t^2.\end{gathered} \tag{2.50}$$

Таблиця 2.4 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.45)–(2.47)

Показник	(2.45)	(2.46)	(2.47)
SS моделі	36328,4	4380,99	302706
MS моделі	3632,84	438,099	30270,6
SS похибки	0,0207407	0,00962963	0,0107407
MS похибки	0,00122	0,000566	0,0006318
$F_{розр}$	29776	77341	479110
$F_{табл}$ ($\alpha = 0,05$)	2,450	2,450	2,450
Адекватність моделі	Так	Так	Так
Максимальний p-value коефіцієнтів	1,000	0,575	1,000
Кількість статистично значущих коефіцієнтів	8 із 10	9 із 10	8 із 10
$t_{табл}$ ($\alpha = 0,05$)	2,110	2,110	2,110
$t_{розр}$ (a_{00})	1524,59	1029,96	9211,42
$t_{розр}$ (a_{10}, a_{70})	626,89	190,15	1738,52
$t_{розр}$ (a_{20}, a_{80})	649,83	335,73	1957,95
$t_{розр}$ (a_{30}, a_{90})	1443,40	38,62	1637,25
$t_{розр}$ (a_{12}, a_{78})	49,59	179,51	172,27
$t_{розр}$ (a_{13}, a_{79})	~~0,00~~	114,01	~~0,00~~
$t_{розр}$ (a_{23}, a_{89})	~~0,00~~	60,65	~~0,00~~
$t_{розр}$ (a_{11}, a_{77})	210,77	32,02	683,24
$t_{розр}$ (a_{22}, a_{88})	241,16	45,17	852,15
$t_{розр}$ (a_{33}, a_{99})	346,35	~~0,57~~	397,3

Отримане рівняння (2.48) характеризує вплив геометричних параметрів дефлекторного вузла − відстані від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, радіуса кривизни дефлекторної поверхні r та товщини крайки дефлектора t − на коефіцієнт варіації інтенсивності факела ψ. Найбільший за абсолютним значенням лінійний коефіцієнт має параметр t, що свідчить про його істотний вплив на рівномірність розподілу рідини. Зменшення товщини крайки спочатку сприяє зниженню коефіцієнта варіації, оскільки крайка менше перешкоджає формуванню та поширенню рідинної плівки по поверхні дефлектора. Водночас наявність додатного квадратичного члена $219,51t^2$ вказує на нелінійний характер цього впливу. Тобто надмірне зменшення або збільшення товщини крайки відносно раціонального значення може погіршувати рівномірність факела.

Параметр l також має виражений вплив на ψ. Від’ємний лінійний член −20,98l свідчить, що збільшення відстані до центра кривизни в досліджуваному діапазоні

загалом сприяє вирівнюванню інтенсивності факела. Фізично це можна пояснити збільшенням робочої ділянки для перетворення початкового струменя у рідинну плівку та її подальшого розтікання по дефлекторній поверхні. Квадратичний член 3,006l2 свідчить про поступове зменшення ефекту при подальшому збільшенні l, тобто існування раціональної області розташування дефлектора.

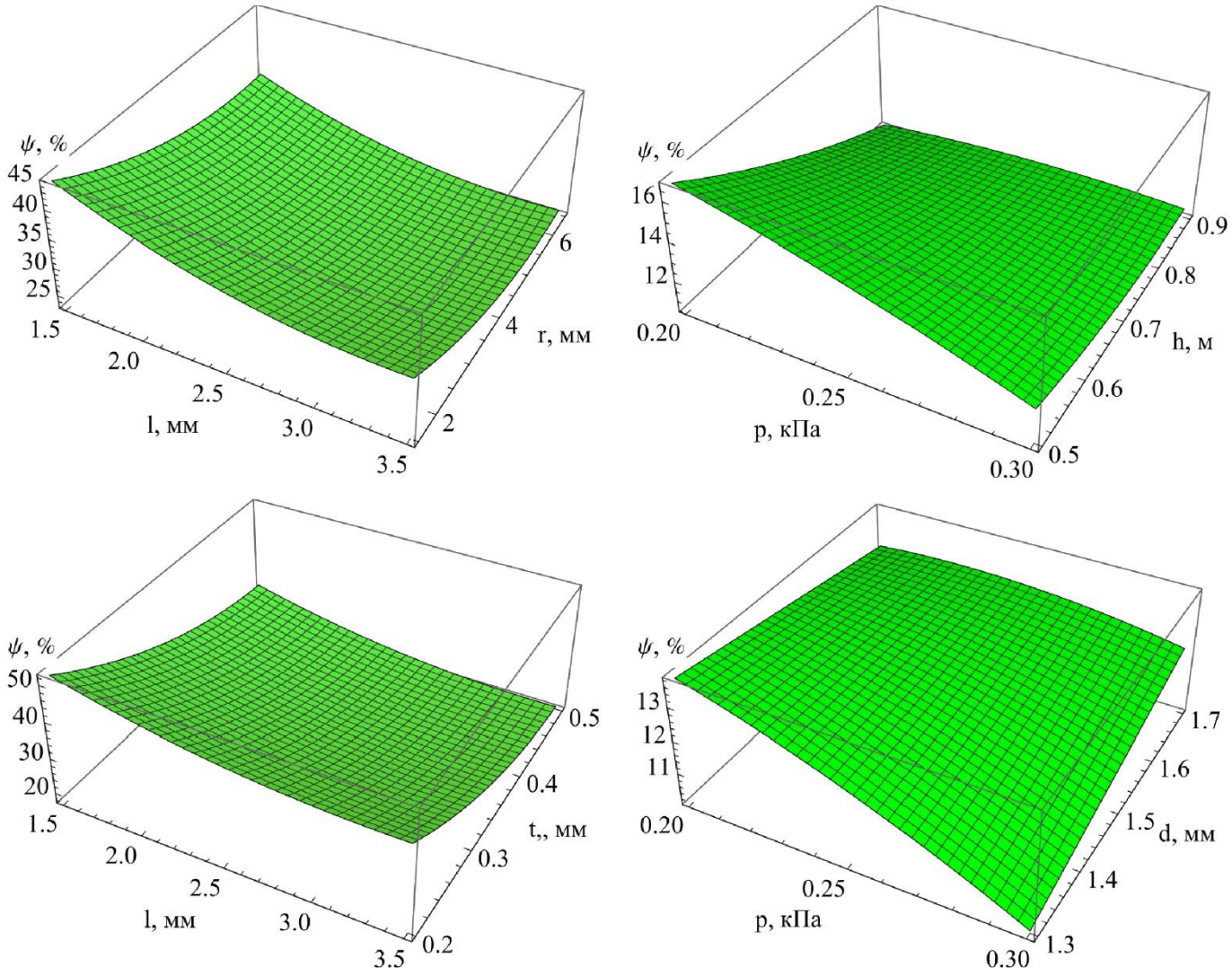


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнту варіації інтенсивності факела ψ від відстані від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, радіусу кривизни дефлекторної поверхні r, товщини крайки дефлектора t, тиску p, висоти штанги h, діаметра дроселя d

Вплив радіуса кривизни r є менш вираженим, однак також має нелінійний характер. Від’ємний лінійний коефіцієнт −7,042r показує тенденцію до зниження ψ зі

збільшенням радіуса, тоді як додатний член $0{,}55r^2$ обумовлює формування мінімуму в певній області значень. З фізичної точки зору, зміна радіуса кривизни визначає характер зміни напрямку руху рідини по дефлектору та умови відриву рідинної плівки. За надто малої кривизни відбувається різка зміна напрямку потоку, а за надто великої − недостатньо інтенсивне відхилення потоку, що в обох випадках може призводити до нерівномірного формування факела.

Взаємодія lr, коефіцієнт якої становить лише 0,19, має порівняно невеликий вплив. Це свідчить, що основний характер зміни рівномірності визначається переважно індивідуальним впливом геометричних параметрів, тоді як їх спільна дія є другорядною.

Таким чином, рівняння (2.48) показує, що мінімізація коефіцієнта варіації інтенсивності факела визначається узгодженим вибором положення дефлектора, його радіуса кривизни та товщини крайки, причому найбільш чутливим параметром є товщина крайки t.

Рівняння (2.49) характеризує вплив діаметра дроселя d, висоти штанги h та робочого тиску p на коефіцієнт варіації інтенсивності факела.

Найбільш виражений лінійний вплив спостерігається для робочого тиску p та висоти штанги h. Від’ємні коефіцієнти $-162{,}94p$ та $-71{,}236h$ свідчать про загальну тенденцію до зменшення коефіцієнта варіації при їх збільшенні в досліджуваному діапазоні. З фізичної точки зору, підвищення тиску збільшує швидкість витікання робочої рідини та інтенсивність її взаємодії з дефлекторною поверхнею. Це сприяє більш стабільному формуванню рідинної плівки та її диспергуванню.

Водночас квадратичний член $-12{,}44p^2$ показує, що вплив тиску не є строго лінійним. У досліджуваному діапазоні тиск забезпечує покращення рівномірності, однак характер зміни показника визначається також його взаємодією з іншими параметрами.

Збільшення висоти штанги h змінює умови просторового розвитку факела після виходу з розпилювача. За недостатньої висоти факел не встигає повністю сформуватися, що призводить до локальних зон підвищеної та зниженої

інтенсивності. Зі збільшенням h відбувається більш повне розкриття факела та вирівнювання розподілу рідини по контрольній поверхні.

Вплив діаметра дроселя d має від'ємний лінійний характер (−25,792d). Збільшення діаметра каналу зменшує гідравлічний опір дросельного елемента та змінює співвідношення між витратою і швидкістю руху рідини. Внаслідок цього змінюється енергетичний баланс струменя та характер його взаємодії з дефлектором.

Особливо важливими є коефіцієнти взаємодії dh, dp та hp. Їх наявність свідчить, що оптимальний режим не може бути визначений незалежним вибором кожного фактора. Наприклад, ефект зміни діаметра дроселя залежить від робочого тиску, а вплив висоти штанги – від швидкості витікання рідини. Це відповідає фізиці процесу, оскільки формування факела є результатом одночасної дії гідравлічних і геометричних параметрів.

Отже, для забезпечення мінімального ψ (2.49) необхідно забезпечити узгоджене співвідношення тиску, пропускної здатності дроселя та висоти формування факела, а не оптимізувати ці фактори ізольовано.

На відміну від коефіцієнта варіації, для кута розкриття факела β (2.50) бажаним є збільшення значення критерію, оскільки більший кут забезпечує формування факела на більшій площі контрольної поверхні.

Найбільш суттєвий вплив має товщина крайки t. Додатний лінійний коефіцієнт 191,53t свідчить про збільшення кута розкриття при збільшенні товщини крайки в початковій частині досліджуваного діапазону. Водночас значний від'ємний квадратичний член $-181{,}23t^2$ свідчить про наявність вираженого максимуму. Отже, існує раціональна товщина крайки, за якої дефлектор забезпечує найбільше розкриття факела.

Параметр l також має виражений нелінійний вплив. Додатний коефіцієнт при l та від'ємний коефіцієнт при l^2 формують максимум функції. Фізично це означає, що при збільшенні відстані до центра кривизни спочатку покращуються умови формування та розширення факела, але після досягнення певного значення подальше збільшення l вже не сприяє його розкриттю.

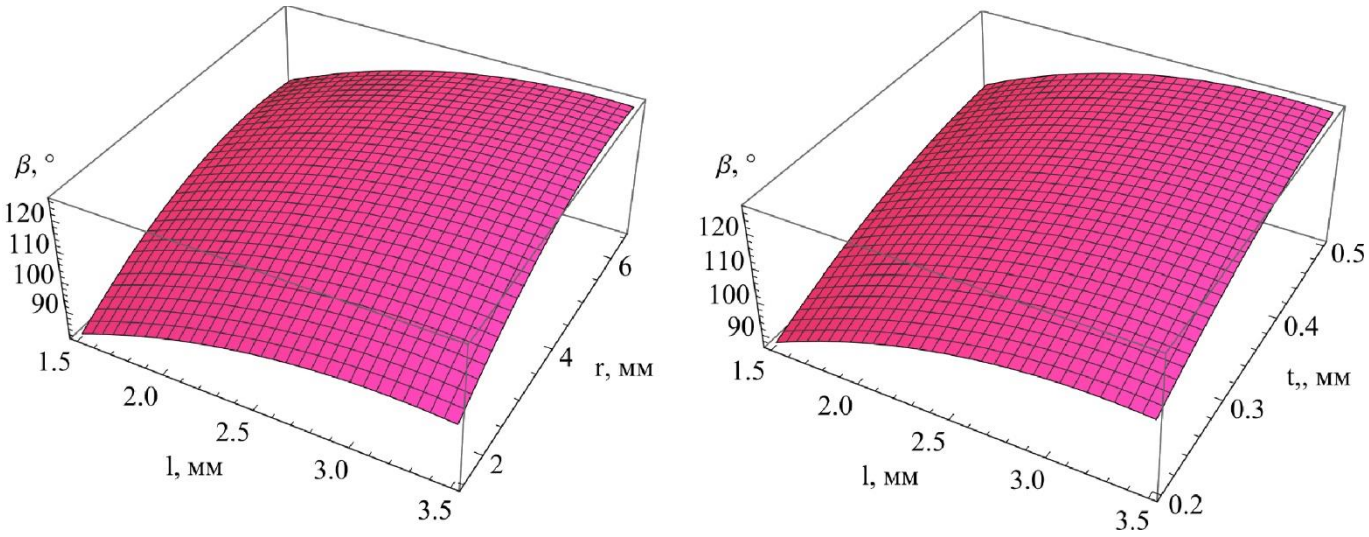


Рисунок 2.13 – Залежність кута розкриття факела β від відстані від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, радіусу кривизни дефлекторної поверхні r, товщини крайки дефлектора t

Вплив радіуса кривизни r є позитивним у лінійній частині та негативним у квадратичній. Таким чином, збільшення радіуса до певного раціонального значення сприяє плавнішій зміні напрямку руху рідини та більш широкому розподілу потоку. Подальше збільшення радіуса призводить до зменшення приросту кута розкриття.

Отримані залежності мають важливе практичне значення: геометричні параметри дефлектора одночасно впливають на два критерії – рівномірність інтенсивності та кут розкриття факела. Тому раціональна конструкція повинна визначатися не за максимумом β або мінімумом ψ окремо, а за їх компромісним поєднанням.

У результаті аналізу рівнянь (2.48)–(2.50) можна зробити висновок, що фізично обґрунтована область раціональних параметрів дефлектора формується внаслідок балансу між енергією потоку, умовами його розтікання по криволінійній поверхні, моментом відриву рідинної плівки та просторовим розвитком сформованого факела. Саме це пояснює наявність квадратичних складових у моделях та існування локальної області оптимальних конструктивних параметрів.

Для визначення раціонального поєднання конструктивних параметрів дефлекторного вузла було використано критерій, що враховує одночасне

забезпечення мінімального коефіцієнта варіації інтенсивності факела ψ та максимального кута його розкриття β. У якості цільової функції використано відношення ψ/β, мінімізація якого забезпечує компроміс між рівномірністю розподілу робочої рідини та площею охоплення факелом.

Чисельну оптимізацію проведено в межах досліджених діапазонів зміни відстані від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, радіуса кривизни дефлекторної поверхні r та товщини крайки дефлектора t. У результаті розрахунку отримано: l = 3,29 мм, r = 5,79 мм, t = 0,51 мм. Отримані значення доцільно округлити з урахуванням технологічної точності виготовлення конструкції до l = 3,3 мм, r = 5,8 мм та t = 0,5 мм. Саме ці параметри доцільно використати як базові під час подальшого виготовлення експериментального зразка та його експериментальної перевірки.

2.6 Висновки з розділу

1. У результаті теоретичних досліджень обґрунтовано підхід до чисельного моделювання процесу формування факела комбінованого розпилювача із застосуванням удосконаленої Ейлерово–Лагранжевої моделі ELSA у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Запропонований динамічний перехід від ейлерової до лагранжевої фази за критеріями сферичності та характерного діаметра крапель забезпечує адекватний опис первинного руйнування суцільного струменя та подальшого руху дисперсної фази. Сформований фізико-математичний апарат і прийняті критерії переходу створюють основу для чисельного дослідження впливу конструктивних і режимних параметрів розпилювача на коефіцієнт варіації інтенсивності та кут розкриття факела, а також для визначення їх раціональних значень. Отримана модель була використана як інструмент обґрунтування конструкції та режимів роботи комбінованого розпилювача для забезпечення необхідної якості розподілу робочої рідини.

2. Розроблено методику чисельного моделювання процесу формування факела комбінованого розпилювача на основі CFD-підходу в середовищі Simcenter STAR-

CCM+. Запропонована розрахункова схема поєднує VOF-модель первинного руйнування струменя, удосконалену ELSA-модель динамічного переходу до лагранжевого опису крапель, KH–RT-модель вторинного дроблення та модель рідинної плівки. Визначено критерії оцінювання якості розпилення – коефіцієнт варіації інтенсивності факела ψ та кут його розкриття β, а також обґрунтовано фактори й межі їх варіювання для струменевого та дефлекторного режимів. Це створює основу для встановлення фізичних закономірностей формування факела та визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів комбінованого розпилювача.

3. За результатами чисельного моделювання встановлено, що на якість формування факела комбінованого розпилювача в струменевому режимі, яку оцінювали за коефіцієнтом варіації інтенсивності факела ψ та кутом його розкриття β, найбільш істотно впливають кут між струменевими отворами φ, діаметр струменевих отворів δ, кількість отворів N, робочий тиск p, висота штанги h та діаметр дроселя d. Встановлено нелінійний характер впливу зазначених факторів і статистично значущу взаємодію окремих параметрів. Оптимізацію здійснювали за мінімізацією відношення ψ/β**,** що забезпечує одночасне підвищення рівномірності розподілу робочої рідини та розширення зони розпилення. За результатами багатокритеріальної оптимізації визначено раціональні конструктивні параметри струменевого вузла**:** кут між струменевими отворами φ = 26,6°, діаметр струменевих отворів δ = 2,2 мм та кількість струменевих отворів N = 5**.**

4. За результатами чисельного моделювання встановлено закономірності формування факела комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі та підтверджено адекватність чисельної моделі на основі удосконаленої ELSA–DEM моделі за результатами порівняння з експериментальними даними. Встановлено, що якість факела визначається коефіцієнтом варіації інтенсивності ψ та кутом його розкриття β, на які найбільш істотно впливають геометричні параметри дефлектора l, r, t, а також робочий тиск p, висота штанги h і діаметр дроселя d. Виявлено нелінійний характер їх впливу та статистично значущі взаємодії факторів. За результатами багатокритеріальної оптимізації за критерієм мінімізації відношення ψ/β визначено

раціональні конструктивні параметри дефлекторного вузла: відстань від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l = 3,3 мм, радіус кривизни дефлекторної поверхні r = 5,8 мм та товщина крайки дефлектора t = 0,5 мм. Отримані параметри забезпечують компроміс між мінімізацією нерівномірності розподілу робочої рідини та максимізацією кута розкриття факела і прийняті як базові для подальшого виготовлення та експериментальної перевірки розпилювача.

3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВНЕСЕННЯ РІДКИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

3.1 Мета і програма досліджень

Експериментальний етап досліджень є ключовою ланкою у вирішенні поставленої науково-технічної задачі, оскільки він дозволяє забезпечити емпіричне підтвердження та практичну верифікацію теоретичних закономірностей і математичних моделей, обґрунтованих розділі 2. Об’єктивне оцінювання працездатності, конструктивної надійності та технологічної ефективності розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив потребує реалізації комплексного методологічного підходу, який поєднує лабораторні та виробничі випробування.

Методологічну основу запланованих експериментів становить сучасна теорія планування експерименту, яка передбачає мінімізацію кількості дослідних ітерацій за умови досягнення заданого рівня точності та статистичної значущості результатів. Застосування системного аналізу гідродинамічних процесів та сучасних інструментів цифрової обробки експериментальних даних дозволяє з високою точністю ідентифікувати характер впливу ключових конструктивних і режимних чинників на показники розподілу робочої рідини.

Сформована структура та послідовність проведення досліджень спрямовані на поетапне розв’язання низки взаємопов’язаних задач: від первинної оцінки стабільності гідравлічних параметрів на спеціалізованих стендах до комплексної валідації робочих процесів обприскувача у польових умовах.

Метою експериментальних досліджень є науково обґрунтована перевірка працездатності та ефективності розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив, а також визначення раціональних параметрів і режимів його роботи, що забезпечують підвищення рівномірності внесення добрив за мінімальних експлуатаційних витрат.

Для досягнення поставленої мети було розроблено програму експериментальних досліджень, яка передбачала:

– виготовлення дослідного зразка пристрою відповідно до оптимальних конструктивних параметрів, аналітично обґрунтованих у розділі 2;

– проведення експериментальних (стендових) досліджень з метою визначення впливу основних конструктивних і режимних параметрів на показники якості роботи запропонованого пристрою;

– оцінку показників рівномірності внесення, витрати рідини та стабільності гідравлічних режимів роботи;

– визначення раціональних параметрів та режимів роботи пристрою;

– верифікація результатів стендових досліджень шляхом проведення польових досліджень у виробничих умовах.

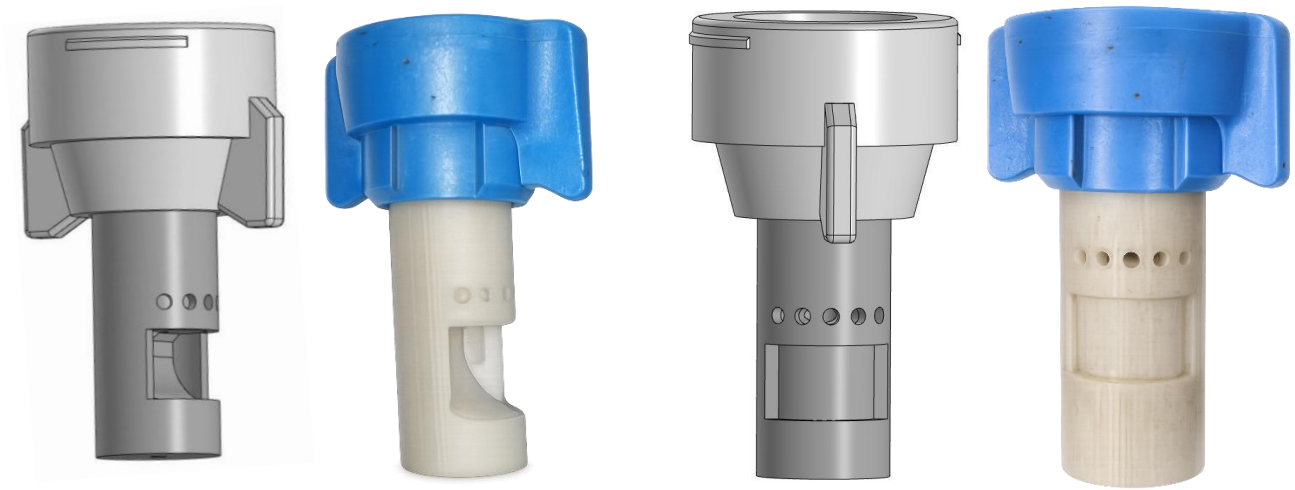
Статистична обробка отриманих експериметальних даних проводилась з використання програмного середовища Wolfram Cloud.

3.2 Методика експериментальних досліджень пристрою для внесення рідких мінеральних добрив

Експериментальні дослідження проводилися з метою встановлення закономірностей впливу конструктивних і режимних параметрів пристрою на основні показники якості внесення рідких мінеральних добрив. Дослідження виконувалися в контрольованих умовах, що забезпечувало повторюваність експериментів і достовірність отриманих результатів.

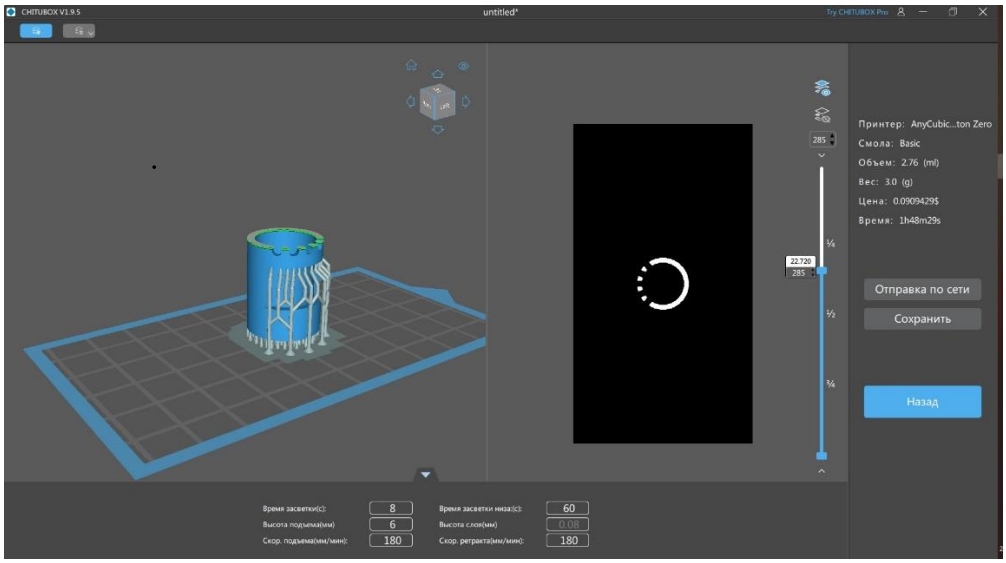
3.2.1 Виготовлення дослідного зразка пристрою

Згідно з оптимальними конструктивними параметрами пристрою, визначеними у розділі 2, було виготовлено експериментальний зразок пристрою для внесення рідких мінеральних добрив (рис. 3.1, а–б). Виготовлення здійснювалося методом адитивних технологій із застосуванням фотополімерного 3D-друку.



а б





в г

Рисунок 3.1 – Виготовлення дослідного зразка пристрою для внесення рідких: а – модель та виготовлений пристрій в дефлекторному режимі; б – модель та виготовлений пристрій в струменевому режимі; в – фотополімерний принтер Anycubic Photon Zero; г – програмне забезпечення для налаштування параметрів друку CHITUBOX v1.95

Для друку використовувався фотополімерний принтер Anycubic Photon Zero (рис. 3.1, в). Підготовка цифрової моделі та налаштування параметрів друку виконувалися за допомогою програмного забезпечення CHITUBOX v1.95 (рис. 3.1, г).

Як матеріал для виготовлення деталей пристрою застосовувалася фотополімерна смола Anycubic ABS-Like Resin Pro (рис. 3.1), яка за своїми механічними властивостями імітує ABS-пластик та характеризується підвищеною міцністю, зниженою крихкістю і малою усадкою, що є важливим для забезпечення геометричної точності дослідного зразка [167].

Режими 3D-друку встановлювалися наступними: товщина шару – 0,08 мм; час експозиції одного шару – 8 с; час експозиції нижніх шарів – 60 с; кількість нижніх шарів – 5; швидкість підйому та опускання платформи – 180 мм/хв. Після завершення друку деталі проходили стандартну постобробку, яка включала промивання в ізопропіловому спирті та ультрафіолетове доопромінення для досягнення необхідних механічних характеристик.

3.2.2 Обладнання та прилади

Лабораторні дослідження пристрою проводилися на спеціалізованому стенді, що імітує роботу гідравлічної системи обприскувача та виготовлений у відповідності до діючого ДСТУ [168].

Стенд складається з резервуару для робочої рідини 1 (рис. 3.2–3.3) об’ємом 400 л, відцентрового насосу 2, електродвигуна 3, системи фільтрації 4, трубопроводів 5, пристрою для регулювання тиску 6, манометрів 7, штанги 8, розпилювальної головки з пристроями, що досліджуються 9, столу 10, розділеного ребрами 11 на канали шириною 0,05 м, мірних циліндрів для збору рідини 12, механізму їх перевертання 13, а також несучої рама 14, на якій змонтовані всі елементи установки. Для надійного закріплення розпилювального обладнання використовується спеціальний тримач 15 з можливістю регулювання висоти розташування штанги над робочею поверхнею столу.

Циклічна робота стенду відбувається у насупній послідовності (рис. 3.2–3.3): рідина з резервуара 1 за допомогою насоса 2, який приводиться електродвигуном 3 через трубопроводи 5, потрапляє до регулятору тиску 6, де встановлюється необхідний тиск та контролюється за допомогою манометрів 7.

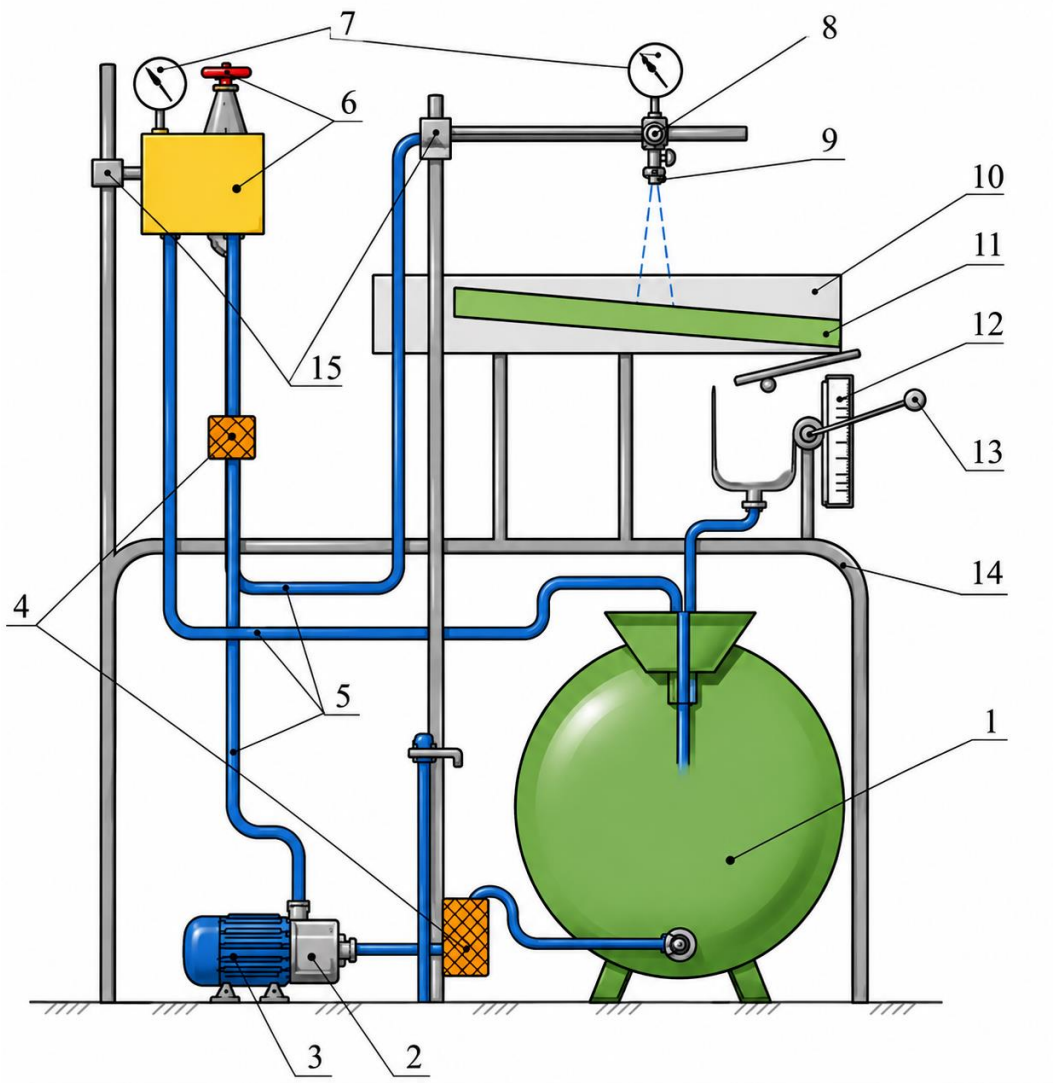


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення стенду для дослідження розпилювачів: 1 – резервуар; 2 – насос; 3 – двигун; 4 – фільтр; 5 – трубопроводи; 6 – регулятор тиску; 7 – манометр; 8 – штанга; 9 – розпилювальна головка; 10 – стіл; 11 – ребра; 12 – мірні циліндри; 13 – механізм перевертання цілиндричних ємностей; 14 – рама; 15 – регулятор висоти штанги

Далі рідина потрапляє до штанги 8, на якій з кроком 0,5 м вставнолені пристрої, що досліджуються. Розпилена рідина надходить до столу 10, поділеного ребрами 11 та стікає до мірних циліндрів 12. Для спорожнення стаканів є механізм їх перевертання 13, за допомогою якого рідина потрапляє назад до резервуару 1.

Стенд забезпечує регулювання висоти штанги 8 над робочим столом 10 в діапазоні від 0,1 до 1,0 м.

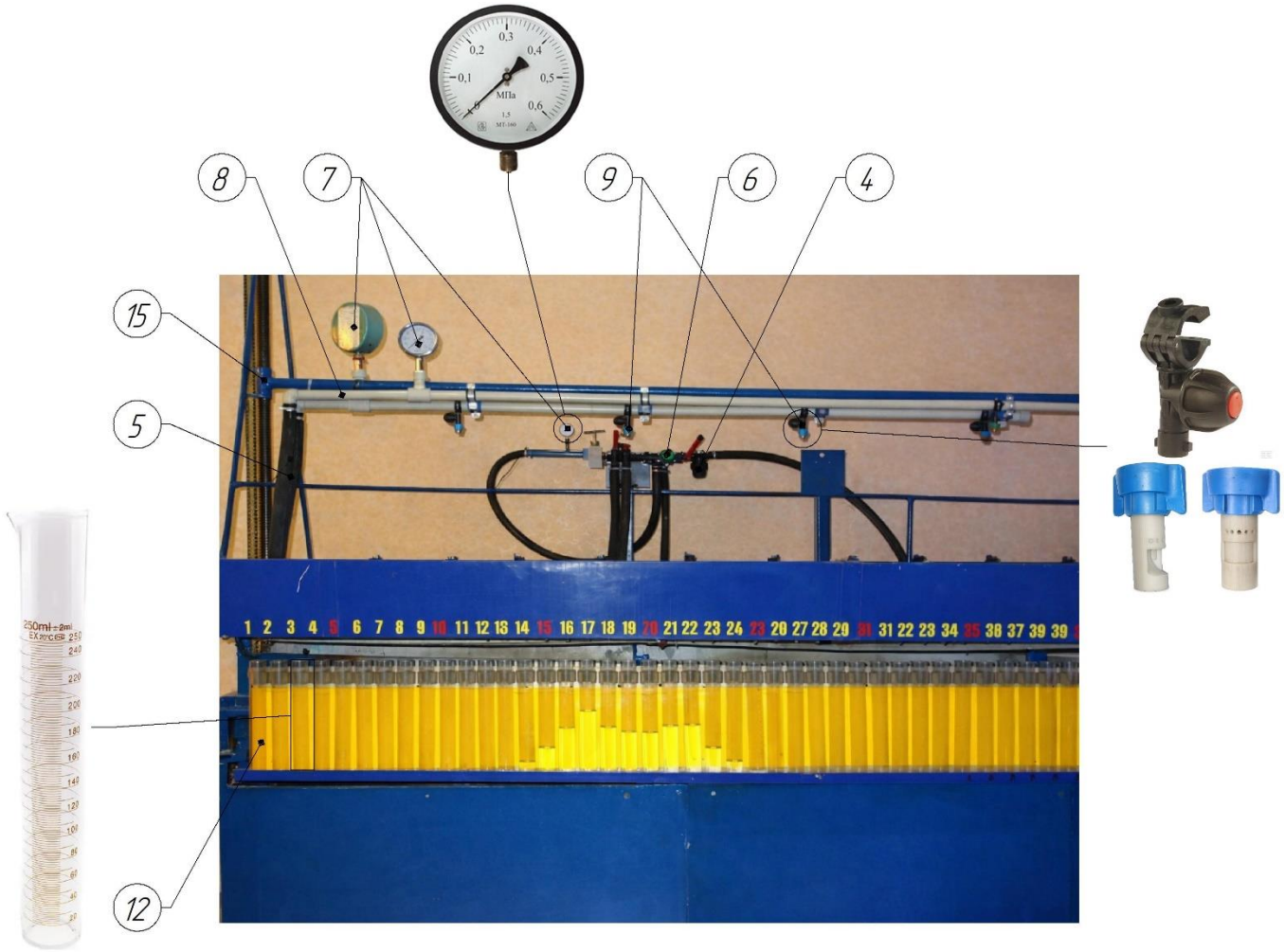


Рисунок 3.3 – Загальний вид стенду:

4 – фільтр; 5 – трубопроводи; 6 – регулятор тиску; 7 – манометр; 8 – штанга;

9 – розпилювальна головка; 12 – мірні циліндри; 15 – регулятор висоти штанги

Манометри (рис. 3.3) 7, для контролю тиску рідини, якими обладнується стенд – МТ-160 з класом точності 1,5 згідно з чинним ДСТУ EN 837-1:2004 [170].

Для визначення хвилинної витрати рідини кожного пристрою використовували мірний циліндр (рис. 3.4, а) на 2000 мл 2 класу точності, з ціною поділки 20 мл та секундомір (рис. 3.4, б).

Регулювання режимів роботи електропривода насоса експериментального стенду здійснювалося за допомогою частотного перетворювача EATON Moeller AWB 8230-1603 (рис. 3.5), який забезпечував керування частотою обертання асинхронного електродвигуна в широкому діапазоні. Використання частотного перетворювача дозволило реалізувати плавну зміну подачі насоса та стабілізацію гідравлічних

параметрів системи без істотного впливу сторонніх збурень. Це забезпечило формування відтворюваних і контрольованих режимів подачі робочої рідини, підвищило точність експериментальних вимірювань і достовірність отриманих результатів, а також зменшило енергетичні втрати та динамічні навантаження на елементи стенду.



а б

Рисунок 3.4 – Обладнання для визначення хвилиної витрати рідини:
а – мірний циліндр на 2000 мл; б – секундомір

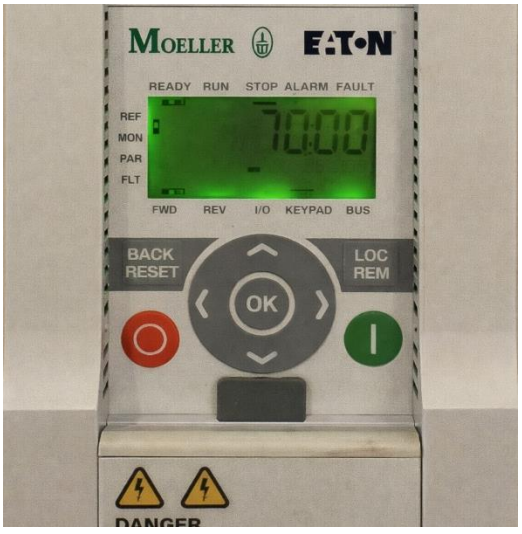


Рисунок 3.5 – Частотний перетворювач EATON Moeller AWB 8230-1603

Точність приладів відповідала вимогам проведення інженерних експериментів і забезпечувала допустиму похибку вимірювань.

3.2.3 Методика проведення експериментальних досліджень пристрою для внесення рідких мінеральних добрив

Експериментальні дослідження пристрою для внесення рідких мінеральних добрив виконувалися в лабораторних умовах із використанням гідравлічного стенду, описаного в підрозділі 3.2.2. Досліджувані пристрої встановлювалися на розпилювальній штанзі стенду з кроком b = 0,5 м, що відповідає типовим конструктивним параметрам серійних обприскувачів. Оцінювання характеристик розподілу робочої рідини здійснювалося в межах досліджуваного діапазону a (рис. 3.6), який визначався як відстань між геометричними центрами першого та третього пристроїв і становив відповідно 1 м.

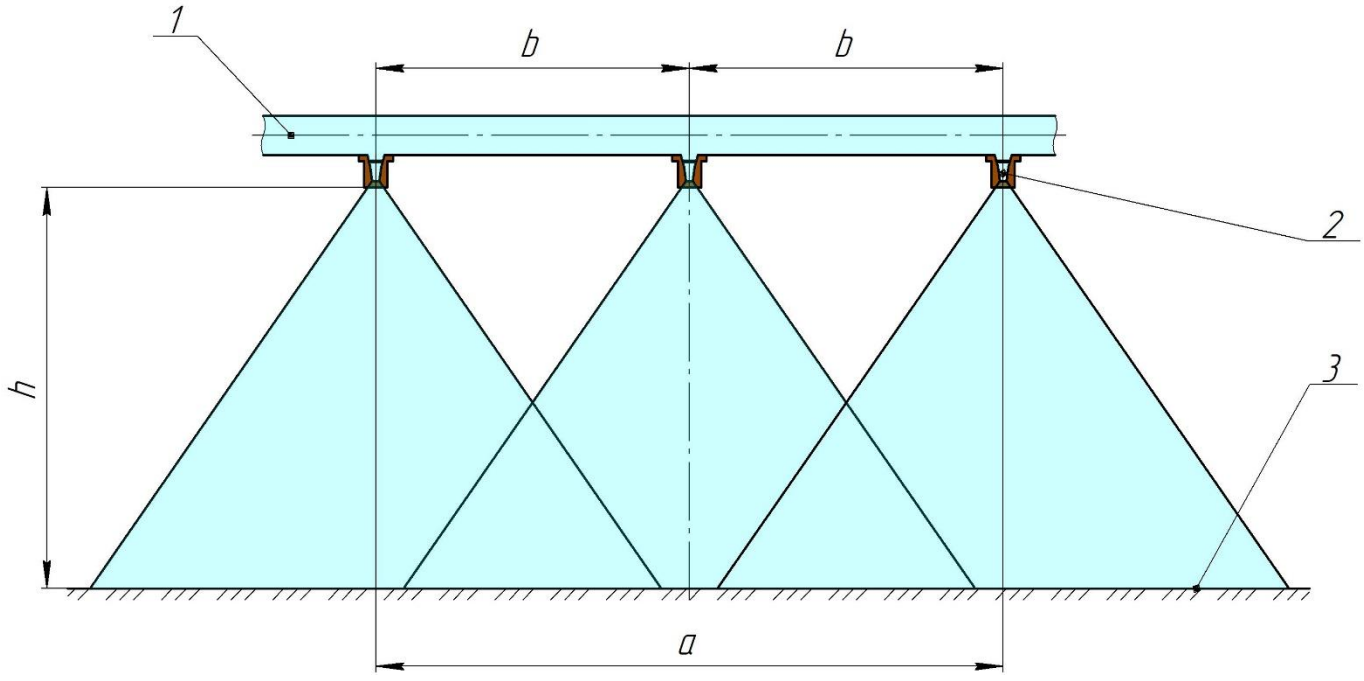
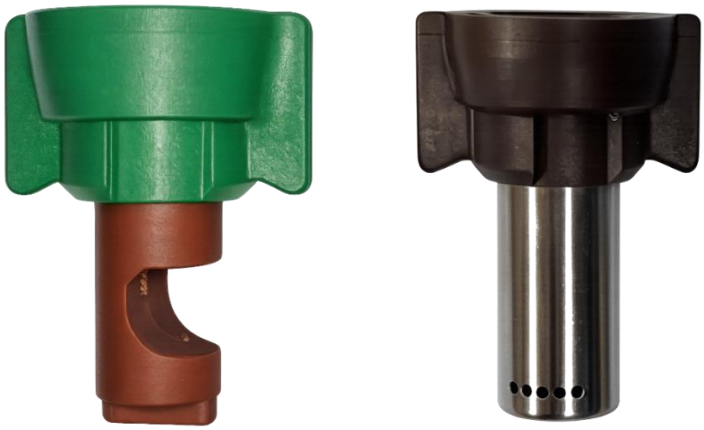


Рисунок 3.6 – Схема розташування досліджуваних пристроїв на стенді:
a – досліжуваний діапазон, м; h – висота розташування штанги відносно столу, м;
b – відстань між розпилювачами на штанзі; 1 – штанга; 2 – розпилювач;
3 – поверхня столу з жолобками для вловлювання розпилених краплин

У зазначеному діапазоні формувався сумарний розподіл робочої рідини, що включав основний факел розпилення другого (центрального) пристрою, а також зони перекриття факелів суміжних пристроїв, що дозволяло коректно оцінити рівномірність внесення рідких мінеральних добрив у поперечному напрямку.

Об’єктом дослідження був розроблений в результаті чисельного моделювання (розділ 2.4–2.5) та виготовлений (розділ 3.2.1) комбінований пристрій для внесення рідких мінеральних добрив [166]. Порівнювали якісні показники роботи пристрою з наступними серійними розпилювачами: дефлекторним РД-4,0 (рис. 3.7, а) [98] та струменевим RD.05.SD5-b (рис. 3.7, б) [93].

Аналізуючи наукові публікації (розділ 1.5) для проведення експерименту були обрані фактори, які мають набільший вплив: робочий тиск P, МПа, висота штанги h, м стенду над вимірювальним столом та змінні дросельні заслінки різного діаметру d, мм. Межі їх варіювання були прийняті шляхом експериментальних досліджень, згідно з агротехнічними вимогами та рекомендаціями виробників і наведені в таблиці 3.1.



а б

Рисунок 3.7 – Серійні розпилювачі рідких мінеральних добрив:
а – РД-4,0; б – RD.05.SD5-b

Дослідження проводилися шляхом поетапної зміни основних конструктивних та режимних параметрів пристрою. Під час експерименту варіювалися значення тиску робочої рідини, діаметра дроселя та висоти встановлення штанги обприскувача.

Таблиця 3.1 – Фактори та межі варіювання

Позначення	Фактор	Рівень факторів			Інтервал варіювання Δ
		-1	0	+1	
x_1	Тиск *p*, МПа	0,2	0,25	0,3	0,05
x_2	Висота штанги *h*, м	0,5	0,7	0,9	0,2
x_3	Діаметр дроселя *d*, мм	1,0	1,5	2,0	0,5

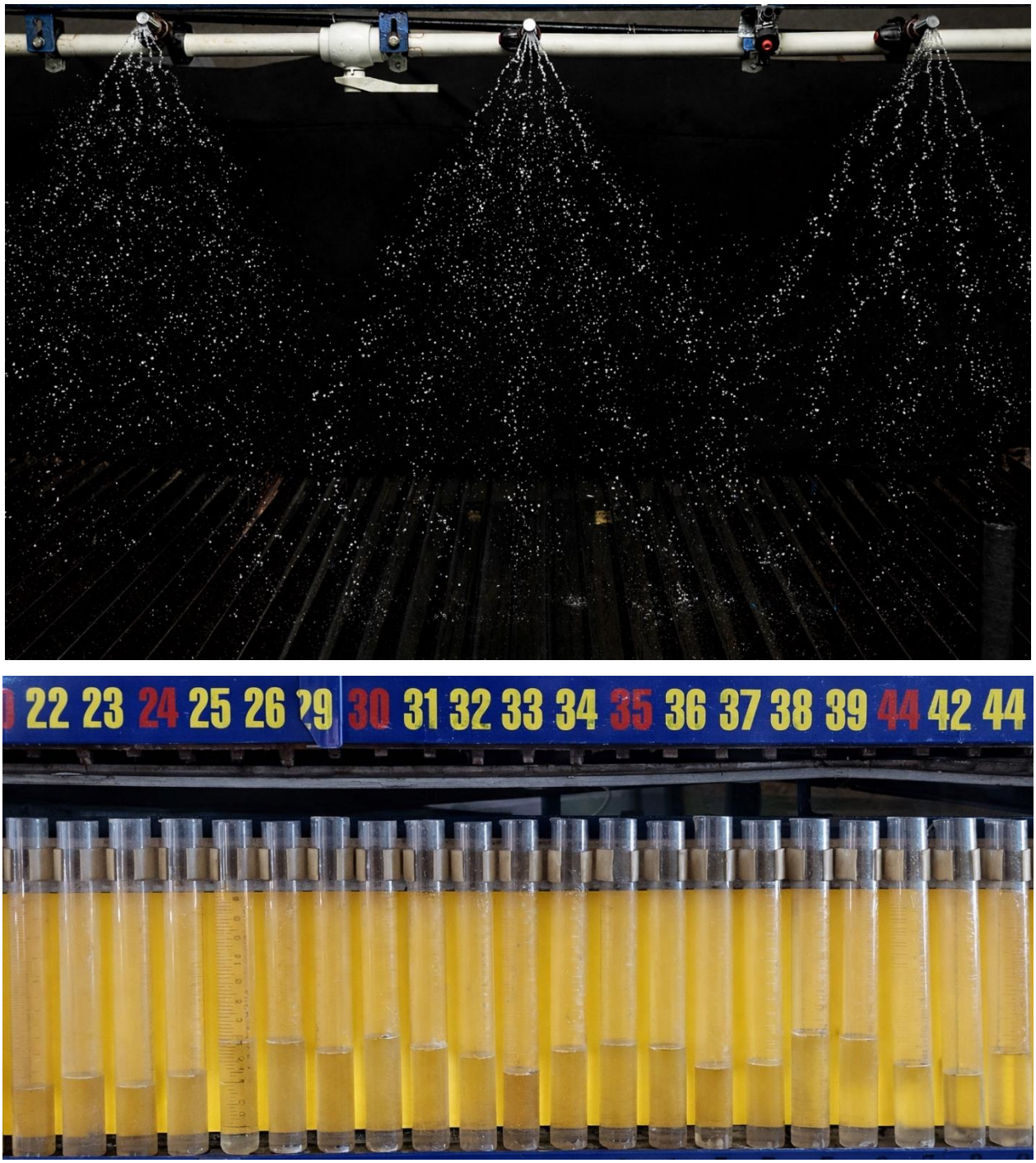


Рисунок 3.8 – Приклад проведення експерименту з дослідження рівномірності розподілу рідини

Для кожної комбінації параметрів визначалися витрата рідини через пристрій, стабільність тиску в системі та рівномірність розподілу рідини.

Рівномірність внесення оцінювали за результатами збору рідини в мірні циліндри, розташовані з рівними інтервалами по ширині захвату. За отриманими даними обчислювався коефіцієнт варіації ψ відповідно до стандарту [171], який використовувався як основний показник якості розподілу рідких мінеральних добрив.

$$\psi = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(V_i - V_{сер}\right)^2}}{V_{сер}} \cdot 100\% \qquad (3.1)$$

де ψ – коефіцієнт варіації поперечного розподілу рідини, %; n – кількість вимірювальних жолобків на жолобковому столі в межах визначеного діапазону, шт; V_i – об'єм рідини, зібраний у *i*-му жолобку вимірювального столу, мл; $V_{сер}$ – середній об'єм рідини з одного жолобка вимірювального столу, мл.

Дослідження проведено з використанням плану експерименту Бокса-Бенкена для трьох факторів, який застосовано з метою оптимізації досліджуваного процесу. План експерименту включав 15 дослідів, реалізованих у триразовій повторності.

3.3 Методика польових досліджень пристрою для внесення рідких мінеральних добрив

Польові дослідження проводилися згідно з чинним стандартом [172] з метою перевірки результатів лабораторних експериментів та оцінювання ефективності роботи розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив у реальних умовах експлуатації. Основним завданням польових випробувань було визначення показників якості розпилення та рівномірності внесення робочої рідини за дії неконтрольованих збурюючих факторів: коливань швидкості руху агрегату, вітрового навантаження та мікрорельєфу.

Дослідження виконувалися з використанням серійного штангового обприскувача ОП-24 (рис. 3.9), обладнаного штатною гідравлічною системою. Розроблений пристрій встановлювався на стандартну штангу обприскувача замість

серійних розпилювачів з кроком встановлення 0,5 м, що відповідає загальноприйнятим конструктивним параметрам сільськогосподарських обприскувачів. Подача рідини до пристрою здійснювалося від штатного мембранно-поршневого насоса обприскувача без внесення змін у конструкцію гідравлічної системи.



Рисунок 3.9 – Серійний штанговий обприскувач ОП-24

Оцінювання показників внесення робочої рідини в польових умовах здійснювалося методом використання водочутливого паперу Syngenta (рис. 3.10), який широко застосовується для аналізу параметрів факела розпилення та характеристик покриття краплинами. Водочутливий папір змінює колір у місцях контакту з краплинами рідини, що дозволяє кількісно та якісно оцінити щільність покриття, розміри краплин і рівномірність їх розподілу по оброблюваній поверхні.

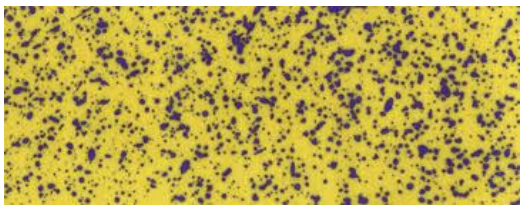
Смужки водочутливого паперу розташовувались на горизонтальній поверхні поля згідно зі схемою (рис. 3.11), а саме: на спеціальних тримачах 1 закріплювались смужки 2 водочутливого паперу.

Тримачі встановлювались з кроком 250 мм в поперечній площині, для дослідження наступних точок: центр факела розпилу; перекриття суміжних факелів. В поздовжній площині тримачі розташовуються з кроком 500 мм. Висота

розташування штанги над цільовою поверхнею відповідала агротехнічним вимогам і встановлювалася в межах, прийнятих у лабораторних дослідженнях (п. 3.2.3).



а



б



в

Рисунок 3.10 – Водочутливого папір (Water-Sensetive Paper) Syngenta розміром 76×26 мм: а – до використання; б – після використання; в – зворотня сторона

Польові випробування проводилися за різних режимів роботи обприскувача: зміни робочого тиску в системі та швидкості руху агрегату. Кожен дослід повторювався не менше трьох разів для забезпечення достовірності результатів. Після проходу обприскувача водочутливий папір відбирався (рис. 3.12), маркувався та піддавався подальшому аналізу.

Наступним кроком було сканування зразків WSP з роздільною здатністю 1200 dpi (рис. 3.12, а). При такій роздільній здатності 1px = 21,17 мкм. Подальшу обробку зображень виконували у середовищі ImageJ(Fiji) [173]. На початковому етапі здійснювали калібрування масштабу зображення відповідно до фактичних розмірів водочутливого паперу. Після цього кольорові зображення переводили у 8-бітний градаційний формат сірого (рис. 3.12, б) (Image → Type → 8-bit) для спрощення сегментації об’єктів.

Далі переводили отримане зображення у бінарний формат (Process → Binary → Make Binary) (рис. 3.12, в), який дозволяє чітко відокремити відбитки краплин від фону водочутливого паперу та забезпечити коректний подальший морфометричний аналіз.

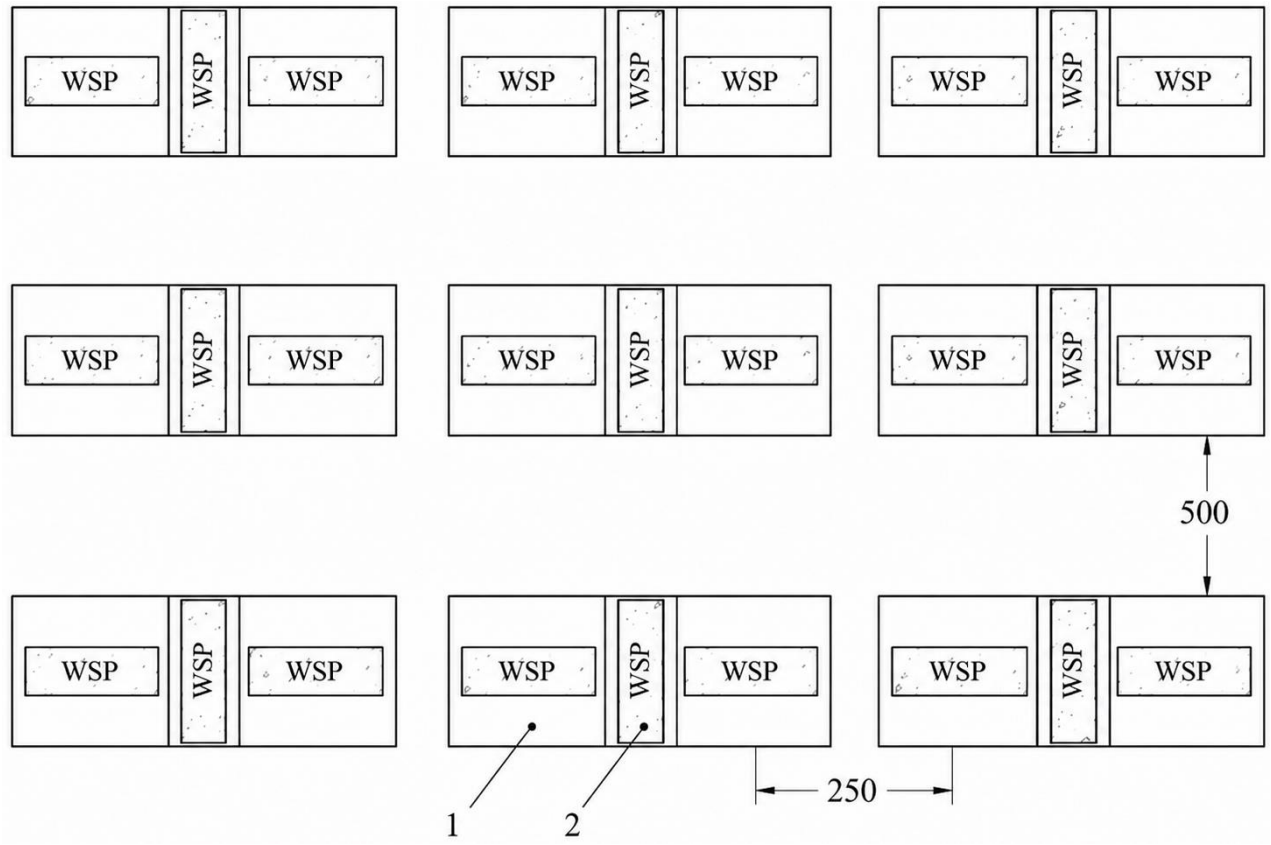
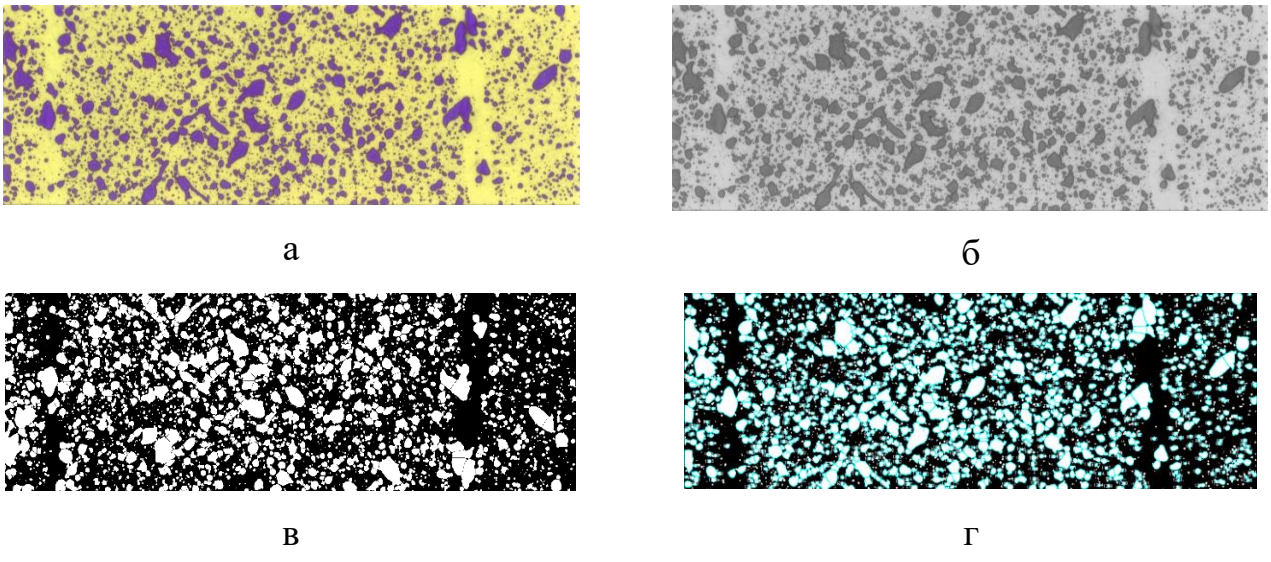


Рисунок 3.11 – Схема розташування смужок водочутливого паперу на полі:
1 – тримач; 2 – водочутливий папір (WSP)



а б в г

Рисунок 3.12 – Покрокова обробка WSP в середовищі ImageJ:
а – відсканований зразок WSP; б – 8-бітне зображення зразка; в – зразок після бінарізації та Watershed; г – зображення зразка після проведення аналізу

Після виконання бінаризації зображення додатково застосовували морфологічну операцію «Watershed» (Process → Binary → Watershed). Даний алгоритм використовували для розділення суміжних або частково перекритих відбитків краплин, що утворюються при високій щільності покриття поверхні. Це дозволяє уникнути помилкового об'єднання декількох краплин в один об'єкт під час автоматичного аналізу.

Кількісний аналіз здійснювали за допомогою інструмента «Analyze Particles» (рис. 3.12, г, 3.13) (Analyze → Analyze Particles), який забезпечує автоматичне визначення геометричних параметрів кожної плями. Дрібні об'єкти, розмір яких був менший за встановлене порогове значення, виключали з аналізу, оскільки вони можуть бути наслідком цифрового шуму або дефектів сканування.

Під час комп'ютерного оброблення та аналізу цифрових зображень водочутливого паперу за допомогою програмного забезпечення ImageJ здійснювали кількісну оцінку комплексу морфометричних і дисперсних показників:

– інтегральний показник покриття цільової поверхні рідиною (f ,%);

– кількість активних відбитків краплин (C, шт) на одиницю площі паперу

– середня лінійна площа поодинокої плями (F, мм^2);

– діаметр окремої плями за Фере ($d_ф$, мкм);

– коефіцієнт округлості (K_{circ}), який характеризує ступінь відхилення форми відбитка від ідеального кола внаслідок динамічного удару чи кута набігання потоку рідини;

– індекс монолітності відбитка (I_s), визначає відношення реальної площі плями до площі її опуклої оболонки та дозволяє ідентифікувати внутрішні нерівності й мікропустоти, які виникають при розбризкуванні.

Інтегральний показник відсотка покриття поверхні є одним із найбільш стабільних і релевантних параметрів, оскільки він найменше піддається впливу випадкових похибок під час бінаризації зображень. Натомість точність ідентифікації та визначення істинного дисперсного складу суттєво лімітується процесами коалесценції – взаємного перекриття (*overlapping*) сусідніх відбитків при високій

щільності покриття, а також динамікою гідродинамічного розтікання рідини на поверхні паперу.

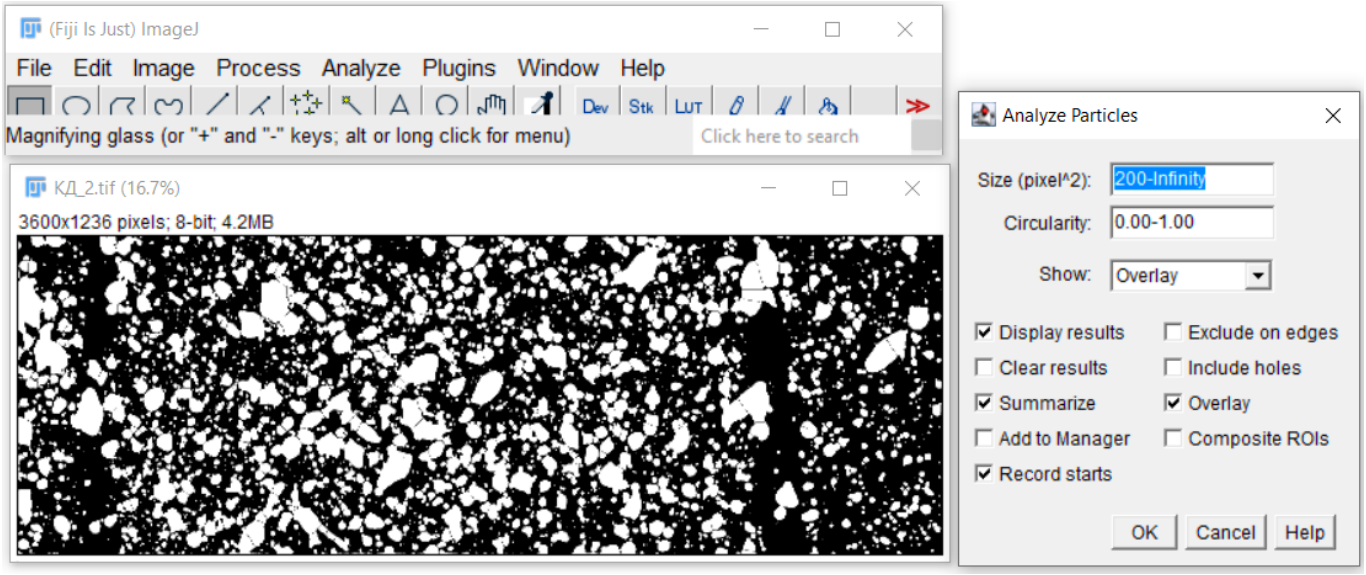


Рисунок 3.13 – Панель налаштувань інструмента Analyze Particles

Отримані результати експортували у табличний формат Excel для подальшої статистичної обробки. Отримані дані порівнювалися з результатами лабораторних досліджень і показниками серійних розпилювачів, що дозволило оцінити ефективність розробленого пристрою в умовах реальної експлуатації.

3.4 Статистичний аналіз експериментальних даних

Статистичну обробку результатів експериментальних досліджень виконували з використанням методів математичної статистики та теорії планування багатофакторних експериментів, що дозволило оцінити достовірність отриманих даних, встановити кількісні закономірності впливу досліджуваних факторів на показники роботи пристрою та обґрунтувати раціональні параметри і режими його функціонування [174].

Лабораторні дослідження проводилися відповідно до плану Бокса-Бенкена для трьох факторів, який забезпечує можливість побудови математичних моделей другого

порядку при відносно невеликій кількості експериментів [175–176]. Обробка експериментальних даних, визначення коефіцієнтів регресії та подальший аналіз виконувалися з використанням програмного середовища Wolfram Cloud.

Побудову математичних моделей здійснювали у вигляді рівнянь регресії другого порядку в кодованих змінних:

$$y = b_0 + \sum_{n=1}^{n} b_i x_i + \sum_{n=1}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{n=1}^{n} b_{ii} x_i^2 \tag{3.2}$$

де y – вихідний параметр (критерій оптимізації); x_i, x_j – незалежні кодовані фактори; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти регресії.

Кодування факторів здійснювали за залежністю:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i} \tag{3.3}$$

де X_i – натуральне значення фактору; X_{0i} – значення фактору на центральному рівні; ΔX_i – інтервал варіювання фактору.

Відтворюваність результатів експериментів оцінювали за даними триразової повторності дослідів із застосуванням критерію Кохрена, який визначали як відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій. Якщо розрахункове значення критерію не перевищувало табличного, дисперсії вважалися однорідними. У разі невиконання цієї умови передбачалося підвищення точності вимірювань, зменшення інтервалів варіювання факторів або збільшення кількості повторень експериментів [177–178].

При аналізі похибок вимірювань враховували, що випадкові відхилення результатів від середнього значення не повинні перевищувати межі $\pm 3\sigma$, де σ – середньоквадратичне відхилення. Значення, що виходили за зазначені межі, виключалися з подальшого аналізу як випадкові викиди. Довірчі межі середніх значень визначали за допомогою критерію Стьюдента [179].

Перевірку адекватності побудованих математичних моделей здійснювали з використанням критерію Фішера шляхом порівняння розрахункового та табличного значень при заданому рівні значущості [179]. Модель вважали адекватною, якщо вона

достовірно описувала експериментальні дані в межах досліджуваного факторного простору.

На основі адекватних регресійних моделей виконували аналіз поверхонь відгуку з метою визначення раціональних параметрів роботи пристрою. Пошук оптимальних значень факторів здійснювали методом канонічного перетворення рівнянь регресії та аналізу двовимірних перетинів поверхні відгуку, побудованих у середовищі Wolfram Cloud [180–181].

Статистичну обробку результатів польових досліджень проводили з використанням елементів дисперсійного аналізу. Вірогідність відмінностей між досліджуваними варіантами оцінювали за *F*-критерієм Фішера [182]. Якщо розрахункове значення критерію перевищувало табличне при рівні значущості 0,05, вплив досліджуваного фактору вважався статистично значущим.

3.5 Висновки з розділу

1. Розроблено та реалізовано методику лабораторних експериментальних досліджень комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив, яка передбачає виготовлення дослідного зразка методом адитивного фотополімерного 3D-друку та проведення випробувань на спеціалізованому гідравлічному стенді відповідно до вимог чинних стандартів. Запропонована методика забезпечує визначення витратних характеристик, оцінювання рівномірності поперечного розподілу робочої рідини, стабільності гідравлічних режимів і дослідження впливу конструктивних та режимних параметрів пристрою на якість внесення рідких мінеральних добрив за умов високої повторюваності й достовірності експериментальних результатів.

2. Розроблено та реалізовано методику експериментальних досліджень комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив, яка передбачає оцінювання його роботи за показниками витрати робочої рідини, рівномірності поперечного розподілу та коефіцієнта варіації з використанням спеціалізованого гідравлічного стенда. Проведено порівняльні дослідження розробленого пристрою із

серійними дефлекторним та струменевим розпилювачами. Як основні фактори дослідження прийнято робочий тиск, висоту розташування штанги та діаметр дросельного елемента, для яких обґрунтовано межі варіювання відповідно до агротехнічних вимог, результатів попередніх досліджень і конструктивних особливостей пристрою. Для математичного опису процесу та визначення раціональних параметрів роботи використано трьохфакторний план експерименту Бокса-Бенкена, а статистичну обробку експериментальних даних виконано із застосуванням критеріїв Кохрена, Стьюдента та Фішера, що забезпечило перевірку відтворюваності експериментів, значущості коефіцієнтів регресії та адекватності побудованих математичних моделей.

3. Розроблено та апробовано методику польових експериментальних досліджень комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив в умовах реальної експлуатації із застосуванням серійного штангового обприскувача без внесення змін до його гідравлічної системи. Методика передбачає оцінювання якості внесення за допомогою водочутливого паперу (Water-Sensitive Paper) з подальшим цифровим обробленням отриманих зображень у програмному середовищі ImageJ. Це дозволило визначати інтегральний показник покриття поверхні, кількість і геометричні параметри відбитків крапель, коефіцієнт округлості, індекс монолітності, а також оцінювати рівномірність розподілу робочої рідини та ефективність формування факела розпилення за різних режимів роботи обприскувача. Отримані результати забезпечили можливість порівняння ефективності розробленого пристрою із серійними розпилювачами та підтвердження результатів лабораторних досліджень у польових умовах.

Основні наукові здобутки розділу підтверджені публікаціями автора [165, 183–185]

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМБІНОВАНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВНЕСЕННЯ РІДКИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

4.1 Результати експериментальних досліджень

Лабораторний етап експериментальних досліджень розпилювачів для внесення рідких мінеральних добрив мав на меті первинну оцінку працездатності розробленого пристрою, визначення його базових гідродинамічних характеристик та встановлення робочих діапазонів варіювання досліджуваних фаткорів. Проведення лабораторних випробувань у контрольованих умовах дозволило мінімізувати вплив випадкових збурюючих факторів (таких як пульсація вітрового потоку, коливання штанги у вертикальній та горизонтальній площинах, нерівності опорної поверхні) та забезпечити високу відтворюваність дослідів.

Програма експериментальних досліджень передбачала виконання таких послідовних етапів:

– візуальний оціночний контроль процесу макроструктурної розкриття та стабілізації факела розпилу за різних значень тиску;

– діагностика герметичності елементів комбінованого пристрою та виявлення можливих підтікань рідини у вузлах з’єднань;

– визначення фактичних витратних характеристик (хвилинної витрати робочої рідини) досліджуваних пристроїв.

4.1.1 Візуальний контроль та оцінка геометрії факела розпилу

На початковому етапі лабораторних випробувань проведено візуальний моніторинг і фіксацію параметрів робочого процесу як серійних аналогів (дефлекторного РД-4,0 та струменевого RD.05.SD5-b), так і розробленого комбінованого пристрою. Основну увагу приділяли стабільності утворення зони

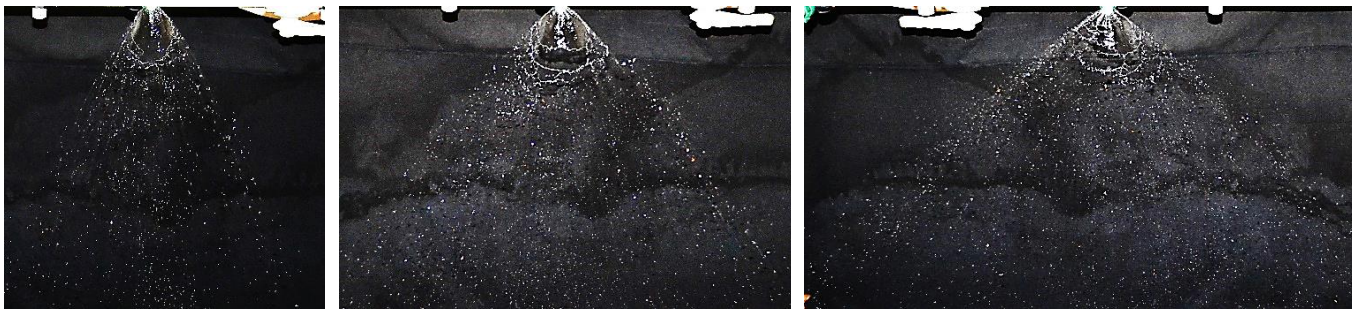
диспергування, динаміці розбудови рідинного потоку та симетричності сформованого факела відносно геометричної осі розпилювача.

Візуальним аналізом фотофіксацій встановлено, що за умов низького робочого тиску ($p \leq 0{,}15$ МПа) спостерігається слабо виражене, нестабільне формування факела розпилу. На рис. 4.1 (а) чітко простежується, що для струменевого розпилювача за тиску 0,15 МПа рідина витікає у вигляді суцільних струменів із вираженою нерівномірністю периферійних зон та відсутністю належного первинного диспергування. Аналогічно, для дефлекторного розпилювача (рис. 4.1, б) за мінімального тиску кінетичної енергії потоку недостатньо для подолання сил поверхневого натягу на зрізі сопла, що призводить до звуження факела та нерівномірного розподілу рідини.



0,15 МПа 0,2 МПа 0,25 МПа 0,3 МПа

а



0,15 МПа 0,2 МПа 0,3 МПа

б

Рисунок 4.1 – Формування факелу розпилу залежно від тиску рідини для розпилювачів: а – струменевого; б – дефлекторного

У ході подальших випробувань зафіксовано чітку кореляційну залежність між гідродинамічними режимами роботи та геометричними характеристиками потоку. Встановлено, що зі збільшенням робочого тиску відбувається збільшення кута факела розпилу. Це зумовлено тим, що підвищення тиску призводить до збільшення початкової кінетичної енергії та тангенціальної складової швидкості витікання рідини з сопла. Для дефлекторного й комбінованого пристроїв це забезпечує інтенсивніше розтікання рідини по робочій поверхні дефлектора, а для струменевих пристроїв – активніше розходження динамічних струмин під дією зростаючого внутрішнього тиску.

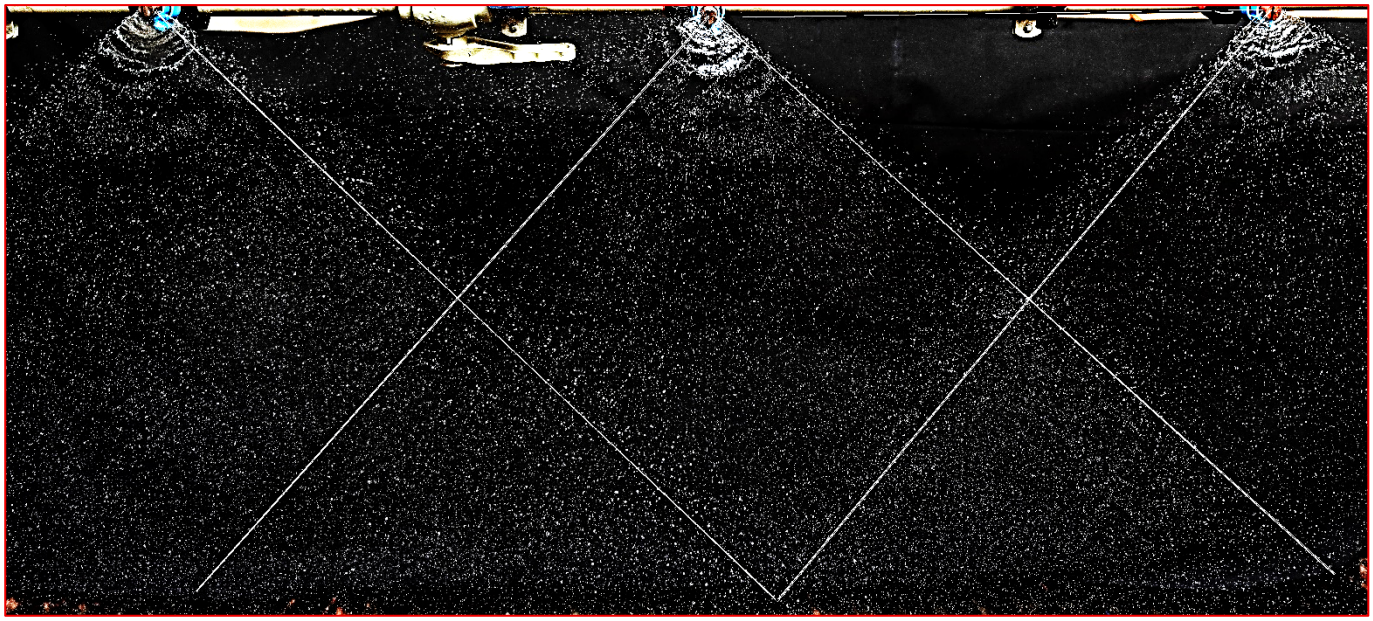
Таким чином, у межах встановленого робочого діапазону тиску (0,20–0,30 МПа) досліджувані пристрої демонстрували стабільне формування чітко окресленого, симетричного факела, без видимих пульсацій та розривів. Зі збільшенням тиску до 0,25–0,30 МПа швидкість витікання рідини зростає, що додатково активізує процеси турбулізації та інтенсифікує розпад струменів на дрібнодисперсні краплі з утворенням стабільної та розвиненої конусоподібної або віялоподібної геометрії.

Крім оцінки макроструктури потоку, особливу увагу було приділено контролю герметичності в місцях спряження змінного дроселя з корпусом комбіного пристрою. Завдяки застосуванню еластичних ущільнювальних елементів та оптимізації геометрії посадкового гнізда вдалося повністю усунути підтікання робочого розчину в усьому діапазоні тиску. Це є критично важливим критерієм для запобігання виникненню локальних хімічних опіків рослин під час внесення концентрованих рідких добрив.

Динамічна зміна кута розпилу безпосередньо впливає на характер взаємодії суміжних потоків на обприскувачі. На рис. 4.2 представлено результати перевірки зони перекриття факелів розпилу для дефлекторного та струменевого типів пристроїв.

Аналіз геометричних параметрів суміжних факелів (рис. 4.2) свідчить, що зафіксований за оптимального тиску кут розпилу забезпечує плавне взаємне перекриття потоків. Стабілізація та збільшення кута факела за тиску 0,25–0,30 МПа дозволяє досягти нормативного перекриття навіть за незначних коливань штанги у вертикальній площині. Для дефлекторних пристроїв (рис. 4.2, а) зона перекриття

характеризується перемішуванням диспергованих фракцій, що мінімізує ризик утворення смугастості внесення. Для струменевої групи (рис. 4.2, б) раціональний крок розташування пристроїв на штанзі у поєднанні з оптимальним кутом факела дозволяють отримати однорідну епюру розподілу, що підтверджує правильність обраних геометричних параметрів розробленого розпилювача.



а



б

Рисунок 4.2 – Дослідження взаємного перекриття факелів розпилу суміжних пристроїв на штанзі: а – дефлекторного; б – струменевого

4.1.2 Дослідження витрати рідини комбінованими пристроями

Визначення хвилинної витрати рідини здійснювали об’ємним методом шляхом суцільного збору робочого розчину, що проходить крізь розпилювальний пристрій за фіксований проміжок часу (розділ 3.2.2). Дослідження проводилися для різних комбінацій робочого тиску та діаметрів змінних дроселів. Результати наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати хвилинної витрати рідини розпилювачами q, л/хв

Параметр	Діаметр змінного дроселя d, мм					
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
Тиск р, МПа	Тип розпилювача					
	РД-4,0			Комбінований		
0,20	1,20	1,58	2,52	1,16	1,54	2,48
0,25	1,32	1,68	2,68	1,28	1,64	2,64
0,30	1,40	1,88	2,78	1,36	1,82	2,72
Тиск р, МПа	Тип розпилювача					
	RD.05.SD5-b			Комбінований		
0,20	1,20	1,74	2,12	1,24	1,76	2,16
0,25	1,30	1,86	2,48	1,34	1,90	2,54
0,30	1,44	2,02	2,80	1,48	2,06	2,88

Результати лабораторних гідравлічних випробувань, наведених у табл. 4.1, свідчить про стійку та закономірну зміну витратних характеристик досліджуваних розпилювачів. Установлено, що хвилинна витрата рідини q, л/хв перебуває у класичній гідродинамічній залежності: вона прямо пропорційна площі перерізу дросельного отвору (d^2) та квадратному кореню від величини тиску рідини $\sqrt{p}$).

Головним критерієм оцінювання працездатності розробленого комбінованого пристрою на цьому етапі була стабільність його гідравлічних параметрів порівняно з промисловими зразками за ідентичних умов функціонування. Згідно з чинними агротехнічними вимогами до машин для внесення рідких мінеральних добрив і засобів захисту рослин, максимальне відхилення фактичної витрати рідини через

окремий розпилювач від базового (номінального) значення не повинно перевищувати ±5%.

Зіставлення експериментальних даних дефлекторної групи розпилювачів показало, що зафіксована невідповідність між витратою серійного виробу РД-4,0 та розробленого комбінованого пристрою коливається в діапазоні 2,3–3,2%. Зокрема, за мінімального тиску p = 0,2 МПа та діаметра змінного дроселя d = 1,0 мм розбіжність становить 2,5%. Зі зростанням тиску до 0,3 МПа та збільшенням діаметра дроселя до 1,5 мм відхилення досягає свого максимуму й становить 3,2%, що повністю задовольняє встановлений агротехнічний ліміт.

Аналогічний характер відповідності характеристик виявлено під час випробувань струменевої групи розпилювачів. Відносне відхилення хвилинної витрати комбінованого пристрою від показників серійного розпилювача RD.05.SD5-b змінюється в межах 1,7-3,1%. Найменшу розбіжність у 1,7% зафіксовано в режимі p = 0,2 МПа та d = 1,5 мм. За умов підвищення тиску до 0,25 МПа та мінімального діаметра дроселя 1,0 мм похибка становить 3,1%.

Зниження витрати для комбінованого дефлекторного пристрою обумовлене виникненням додаткових локальних гідравлічних опорів у внутрішній порожнині корпусу через інтеграцію туди конструктивного елемента – змінного дроселя. Проте незначне звуження потоку компенсується вирівнюванням поля швидкостей перед вихідним отвором. Навпаки, у комбінованому струменевому пристрої зафіксовано незначне збільшення витрати, що пояснюється стабілізацією внутрішньокамерного тиску та зниженням турбулізації потоку на вході в сопло завдяки раціональній геометрії посадкового гнізда під дросель.

Наступним логічним етапом досліджень стало проведення розширеного багатофакторного експерименту на спеціалізованому лабораторному стенд. Цей комплекс досліджень (детально висвітлений у підрозділі 4.2) був спрямований на математичне моделювання та аналітичне визначення комбінацій факторів (робочого тиску, висоти розташування штанги та діаметра дроселя), які забезпечують покращення рівномірності поперечного розподілу рідини по цільовій поверхні.

4.2. Результати експериментальних досліджень комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив

Експериментальні дослідження були націлені на визначення впливу досліджуваних факторів на критерій оптимізації розподілу рідини по цільовій поверхні, який виражений через коефіцієнт варіації $\psi \to 0$.

Результати досліджень наведені в додатку Д. Статистичну обробку проводили в середовищі програмного пакету Wolfram Cloud, що дозволило отримати рівняння регресії другого порядку залежності коефіцієнта варіації від досліжуваних факторів у закодованому вигляді для серійних (4.1), (4.3) та розробленого розпилювачів (4.2), (4.4):

– для РД-4,0

$$\psi = 12,65 - 1,045x_1 - 1,55x_2 + 0,4597x_2^2 + 0,2625x_3 - 0,29x_2 \cdot x_3 + 0,168x_3^2 \quad (4.1)$$

– для комбінованого дефлекторного

$$\psi = 12,5 - 1,0625x_1 - 0,3125x_1^2 - 1,8875x_2 - 0,075x_1 \cdot x_2 + 0,4375x_2^2 + 0,225x_3 \quad (4.2)$$

– для RD.05.SD5-b

$$\begin{aligned} \psi = {} & 27,2 - 1,95x_1 + 0,27x_1^2 - 3,6041x_2 - 0,308x_1 \cdot x_2 - \\ & -1,91x_2^2 + 3,3958x_3 - 0,291x_1 \cdot x_3 - 0,68x_2 \cdot x_3 + 1,797x_3^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

– для комбінованого струменевого

$$\begin{aligned} \psi = {} & 26,06 - 2,075x_1 + 1,004x_1^2 - 5,7125x_2 - 0,6x_1 \cdot x_2 - \\ & -1,32x_2^2 + 2,9375x_3 - 0,15x_1 \cdot x_3 - 0,675x_2 \cdot x_3 + 2,23x_3^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

де ψ – коефіцієнт варіації, %; x_1, x_2, x_3 – закодовані значення тиску P, висоти розташування штанги над цільовою поверхнею h та діаметра змінного дроселя d.

Результати статистичної обробки рівнянь (4.1)–(4.4) подано у вигляді таблиці 4.2 та додатку Д. За критерієм Фішера *F* перевірена адекватність моделей, а однорідність за критерієм Кохрена *G*.

Таблиця 4.2 демонструє результати перевірки на однорідність дисперсій. Розрахункові значення критерію для всіх варіантів рівнянь (4.1)–(4.4) є меншими за

табличне значення. Це свідчить, що дисперсії є однорідними, а результати експериментів – відтворюваними. Розрахункове значення F-критерію для рівнянь (4.1)–(4.4) перевищують відповідні табличні значення, що вказує на статистичну значущість моделей і їх відповідність експериментальним даним.

Далі проведено оцінку значущості коефіцієнтів рівнянь регресії за критерієм Стьюдента (*t*). При рівні значущості 0,05 та числі ступенів свободи 30 отримали значення дисперсії відтворюваності $S_{вос}^2$ та дисперсію адекватності $S_{ад}^2$, які свідчать про достатню точність оцінки коефіцієнтів та коректність побудови моделі.

Таблиця 4.2 – Результати статистичної обробки рівнянь (4.1)–(4.4)

<table>
<tr><th>Критерій</th><th>Рівняння</th><th>Розрахункове</th><th>Табличне</th><th colspan="2">Результат</th></tr>
<tr><td rowspan="4">G</td><td>(4.1)</td><td>0,1421</td><td rowspan="4">0,3346</td><td colspan="2" rowspan="4">Дисперсії однорідні</td></tr>
<tr><td>(4.2)</td><td>0,1385</td></tr>
<tr><td>(4.3)</td><td>0,1246</td></tr>
<tr><td>(4.4)</td><td>0,1764</td></tr>
<tr><td rowspan="5">t</td><td colspan="2" rowspan="2"></td><td rowspan="2">t(0,05;30)</td><td>$S_{вос}^2$</td><td>$S_{ад}^2$</td></tr>
<tr><td colspan="2">(4.1)</td><td rowspan="4">2,04</td><td>0,0194</td><td>0,1137</td></tr>
<tr><td colspan="2">(4.2)</td><td>0,010</td><td>0,037</td></tr>
<tr><td colspan="2">(4.3)</td><td>0,041</td><td>4,27</td></tr>
<tr><td colspan="2">(4.4)</td><td>0,043</td><td>5,97</td></tr>
<tr><td rowspan="4">F</td><td>(4.1)</td><td>5,9029</td><td rowspan="2">2,27</td><td colspan="2" rowspan="4">Модель адекватна</td></tr>
<tr><td>(4.2)</td><td>3,7031</td></tr>
<tr><td>(4.3)</td><td>102,8638</td><td rowspan="2">2,53</td></tr>
<tr><td>(4.4)</td><td>137,8266</td></tr>
</table>

Наступним етапом дослідження після перевірки адекватності та статистичної значущості моделей було проведення розкодування рівнянь регресії другого порядку. Даний етап передбачає перехід від кодованих значень факторів до їх натуральних фізичних величин, що забезпечує можливість практичного використання отриманих математичних залежностей:

– для РД-4,0

$$\psi = 26,51 + 0,67d^2 + 0,60d - 2,9 \cdot h \cdot d - 19,34h + 11,49h^2 - 20,94p \qquad (4.5)$$

– для комбінованого дефлекторного

$$\psi = 19{,}97 + 0{,}45d + 10{,}93h^2 - 22{,}87h - 7{,}5p \cdot h + 46{,}5p - 125p^2 \qquad (4.6)$$

– для RD.05.SD5-b

$$\begin{aligned}\psi = 21{,}92 + 7{,}18d^2 - 47{,}98h^2 + 67{,}11h - 30{,}83p \cdot h - \\ -7{,}07d - 6{,}83h \cdot d - 11{,}66p \cdot d - 54{,}36p + 108{,}88p^2\end{aligned} \qquad (4.7)$$

– для комбінованого струменевого

$$\begin{aligned}\psi = 56{,}77 + 8{,}91d^2 - 33{,}02h^2 + 42{,}79h - 59{,}9p \cdot h - \\ -14{,}65d - 6{,}75h \cdot d - 5{,}9p \cdot d - 191{,}3p + 401{,}6p^2\end{aligned} \qquad (4.8)$$

З метою забезпечення наочності та поглибленої інтерпретації результатів досліджень (4.5)–(4.8) було побудовано поверхні відгуку, наведені на рис. 4.3–4,4. Зазначені графічні залежності відображають характер взаємодії основних факторів процесу, а саме: робочого тиску p, висоти розташування штанги над цільовою поверхнею h та діаметра дросельного отвору d, на критерій оптимізації – рівномірність розподілу рідини ψ.

Аналіз побудованих поверхонь відгуку (рис. 4.1–4.2) свідчить про наявність суттєвого та взаємопов’язаного впливу досліджуваних факторів на показник рівномірності поперечного розподілу рідини. Встановлено, що зміна кожного з параметрів не лише безпосередньо впливає на коефіцієнт варіації, але й істотно змінює характер впливу інших факторів, що підтверджує наявність виражених нелінійних ефектів та їх взаємодії. Такий характер залежностей обумовлений складною гідродинамікою процесу формування факела розпилу, диспергування рідини та перекриття струменів у робочій зоні.

Отримані графічні та аналітичні залежності дозволяють ідентифікувати область раціональних (оптимальних) значень технологічних параметрів, у межах якої досягається мінімальне значення коефіцієнта варіації, тобто максимальна рівномірність розподілу рідини по цільовій поверхні. Програмну реалізацію проводили в середовищі Wolfram Cloud, код наведений в додатку Д.

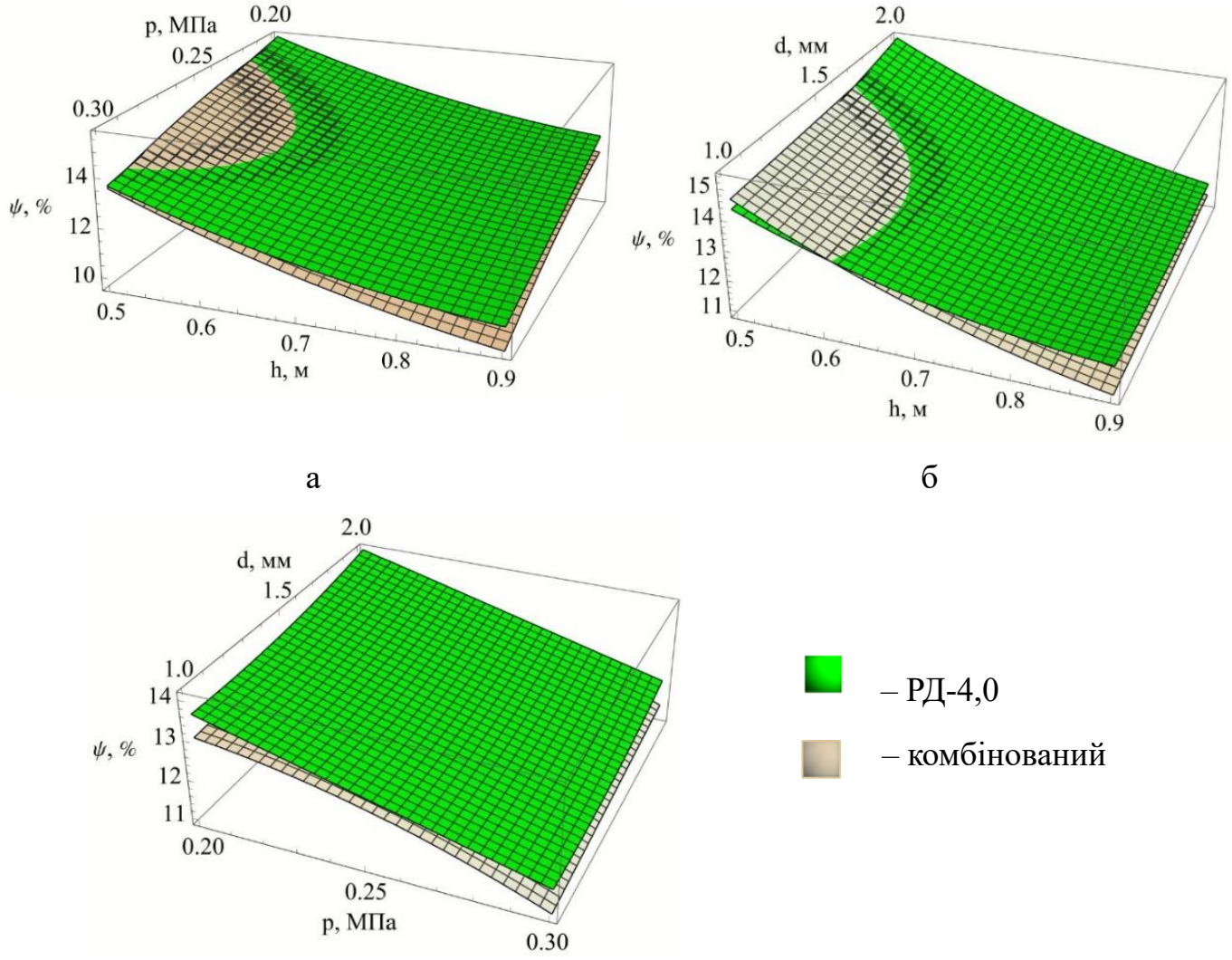


Рисунок 4.3 – Залежність коефіцієнта варіації
поперечного розподілу рідини ψ, % від:
а – тиску рідини p, МПа та висоти розташування штанги h, м;
б – діаметра змінного дроселя d, мм та висоти розташування штанги h, м;
в – діаметра змінного дроселя d, мм та тиску рідини p МПа.

Оптимальні значення коефіцієнта варіації ψ для дефлекторних розпилювачів досягається за наступних досліджуваних факторів:

– для РД-4,0

ψ = 10,5, при p = 0,3 МПа, h = 0,9 м, d = 1,5 мм.

– для комбінованого

ψ = 9,37, при p = 0,3 МПа, h = 0,9 м, d = 1,0 мм.

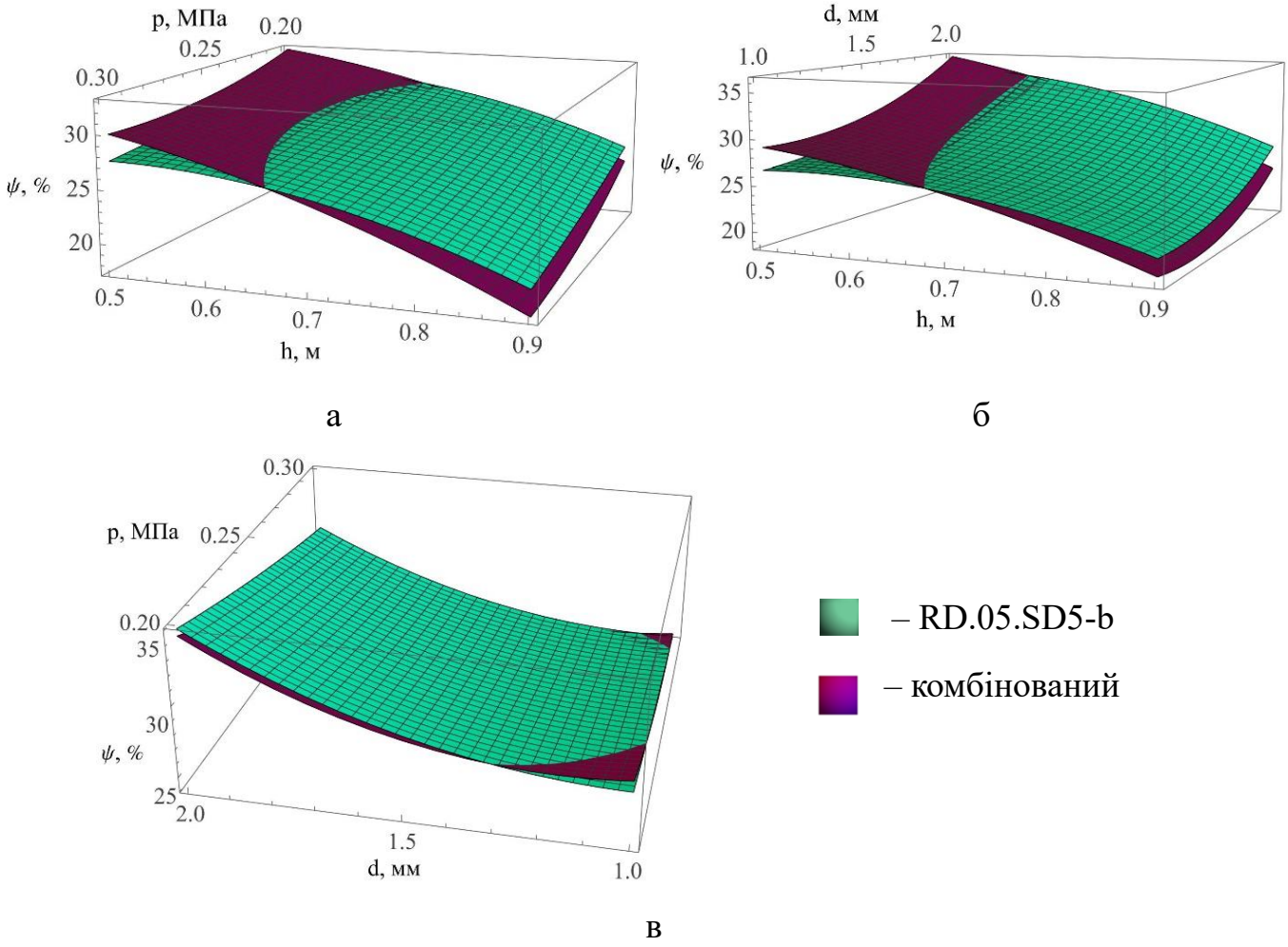


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнта варіації
поперечного розподілу рідини ψ, % від:
а – тиску рідини p, МПа та висоти розташування штанги h, м;
б – діаметра змінного дроселя d, мм та висоти розташування штанги h, м;
в – діаметра змінного дроселя d, мм та тиску рідини p МПа.

Для розпилювача RD.05.SD5-b найменше значення коефіцієнта варіації ψ становить 18,9 %, отримано за наступних комбінацій факторів: робочого тиску p = 0,3 МПа, висоти штанги h = 0,9 м та діаметра дросельного отвору d = 1,16 мм. Для комбінованого ψ = 16,8 % за робочого тиску p = 0,3 МПа, висоти штанги h = 0,9 м та діаметра дросельного отвору d = 1,2 мм.

За таких умов сформований факел розпилу характеризується найвищим ступенем рівномірності розподілу рідини, що свідчить про стабільність процесу формування струменів і раціональне перекриття суміжних зон розпилення.

4.3 Результати польових досліджень пристрою

Логічним завершенням комплексу теоретичних та лабораторно-експериментальних досліджень є перевірка працездатності й оцінка агротехнічної ефективності розробленого комбінованого розпилювального пристрою в реальних експлуатаційних умовах. Польові дослідження виконувалися у чіткій відповідності до розробленої програми та методики, детально викладених у підрозділі 3.3.

Головним критерієм оцінки якості функціонування як серійних аналогів, так і запропонованої конструкції розпилювача в польових умовах було визначено щільність (густоту) покриття цільової поверхні краплинами. Моніторинг дисперсності розподілу робочої рідини здійснювали за допомогою методу штучних індикаторів із застосуванням спеціалізованого водно-чутливого паперу (Water-Sensitive Paper).

Для мінімізації впливу випадкових збурюючих факторів та забезпечення порівнянності результатів, усі експериментальні проходи штангового обприскувача виконували за фіксованих базових параметрів технологічного процесу та стабільних фонових показників навколишнього середовища. Зокрема, встановлена робоча швидкість руху машино-тракторного агрегату становила $V_p = 10$ км/год, що відповідає середнім значенням при внесення рідких добрив та засобів захисту рослин. Температура навколишнього повітря під час проведення серії дослідів знаходилася в межах T = 14°C, швидкість вітру перебувала у межах до 5 м/с (рис. 3.9).

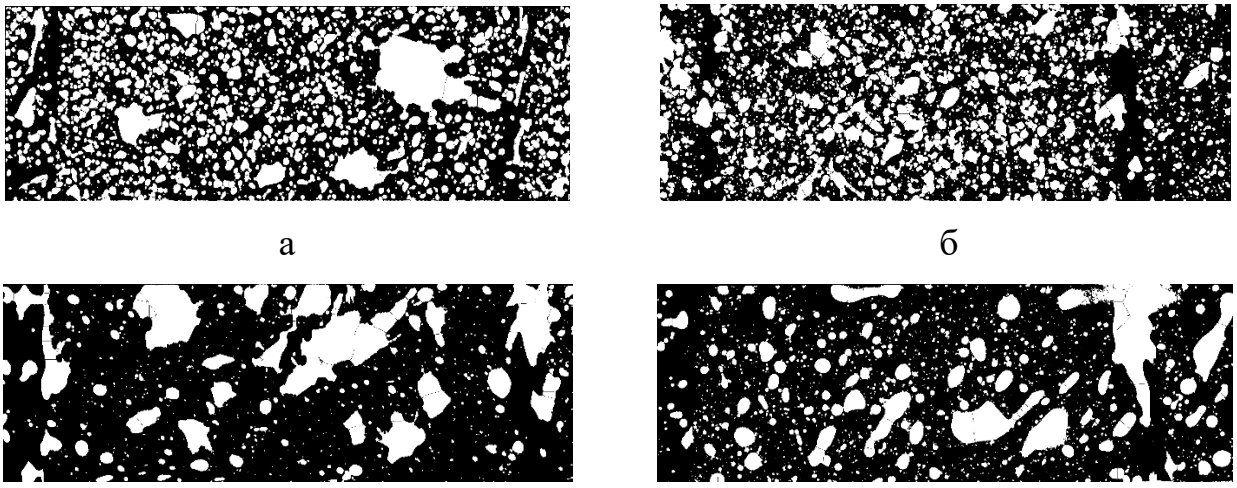
Для встановлення просторової структури осадження крапель за реальних експлуатаційних чинників було проведено серію робочих проходів агрегату. Оцінку інтегральних показників якості розпилення здійснювали на основі аналізу топографії розподілу робочої рідини по контрольних точках облікових ділянок. Візуалізацію

умов проведення експерименту та загальну схему фіксації відбитків потоку представлено на рисунку 4.5.



а б

Рисунок 4.5 – Тримач з водочутливим папером:
а – до проходу агрегату; б – після проходу



а б в г

Рисунок 4.6 – Бінарні відбитки роботи розпилювачів:
а – РД-4,0; б – дефлекторний; в – RD.05.SD5-b; г – струменевий

Прямим підтвердженням високої рівномірності сформованого рідинного потоку є одержані в ході випробувань первинні носії інформації – картки-індикатори. Для детального вивчення внутрішньої структури факела розпилу та визначення кількісних параметрів дисперсності було проведено поштучний аналіз кожної облікової точки.

На рисунку 4.6 відтворено характерні бінарні матриці відсканованих зразків водочутливого паперу, які наочно демонструють відмінності в архітектоніці покриття між серійними розпилювачами та розробленою конструкцією пристрою.

Таблиця 4.3 – Результати аналізу бінарних відбитків в середовищі ImageJ

Показник	Бінарний відбиток			
	(рис. 4.6, а)	(рис. 4.6, б)	(рис. 4.6, в)	(рис. 4.6, г)
Загальна кількість відбитків, шт	1818	2236	850	1486
Кількість відбитків на 1 см^2, шт	84–92	110–118	38–45	72–77
Коефіцієнт покриття поверхні, %	25,6	30,8	24,2	28,9
Середня площа відбитка, мм^2	0,20	0,29	0,59	0,50
Середній діаметр Фере, мкм	563	586	613	650
Коефіцієнт круговості	0,36	0,52	0,40	0,42
Індекс монолітності	0,83	0,83	0,78	0,80

Серійний дефлекторний розпилювач РД-4,0 (зразок на рис. 4.6, а) продемонстрував нижчу інтенсивність подрібнення потоку, про що свідчить загальна кількість ідентифікованих відбитків (1818 шт.). При цьому коефіцієнт покриття поверхні склав 25,6 %. Додатковим доказом цього є вищі значення середньої площі відбитка плями (0,2 мм^2) та максимального діаметра за Фере (563 мкм). Низьке значення коефіцієнта круговості (0,36) у поєднанні з індексом монолітності 0,835 вказує на суттєвий ексцентриситет та асиметричну форма відбитків із нерівними краями. Фізично це пояснюється двома паралельними процесами: косим ударом крапель об папір через парусність потоку під дією польової турбулентності, а також інтенсивною вторинною коагуляцією (злиттям) суміжних часток на поверхні індикатора. Це створює високий ризик локального перевищення норми внесення добрива і його подальшого стікання з листкової поверхні на ґрунт.

При переході до серійного струменевого розпилювача RD.05.SD5-b (рис. 4.6, в) спостерігається зміна характеру розподілу: покриття набуває вираженого дискретного, смугового характеру, оскільки основна маса рідини локалізується вздовж ліній падіння сформованих струменів. Це зумовлює значне зростання

середньої площі відбитка до 0,59 мм² та підвищення загального коефіцієнта варіації по ширині захвату.

Найбільш раціональні, з точки зору сучасних агротехнічних вимог, результати зафіксовані під час експлуатації запропонованого струменевого (рис. 4.6, г) та дефлекторного (рис. 4.6, б) розпилювачів. За рахунок інтеграції змінного дроселя та оптимізації геометрії робочих органів забезпечується ефективне перетворення кінетичної енергії гідравлічного струменя, що сприяє його якісному первинному диспергуванню.

Математичним підтвердженням високої ефективності розроблених рішень є суттєве зростання загальної кількості відбитків часток на одиницю площі порівняно з базовими серійними аналогами. Зокрема, запропонований дефлекторний пристрій забезпечує щільність 110–118 шт/см² проти 84-92 шт/см² у РД-4,0. Важливо, що оптимізація щільності потоку супроводжується стабілізацією лінійних розмірів за Фере та генерацією більш монодисперсного спектра краплин, позбавленого як надмірно великих часток, так і ультрадрібної фракції (менше 100 мкм), яка є найбільш схильною до вітрового знесення та випаровування.

Також було підтверджено стабільність динаміки польоту та осадження часток комбінованими пристроями, яка виражена через зміну коефіцієнтів форми відбитків. Показник круговості для модифікованого дефлекторного пристрою суттєво зріс і склав 0,52 порівняно з 0,36 у базового варіанта РД-4,0. Наближення форми відбитка до топології правильного кола є строгим математичним доказом того, що згенеровані пристроями краплі мають раціональну масу та кінетичну енергію, стійко протистоять збурюючому впливу повітряних мас і здійснюють удар об цільову поверхню по траєкторії, близькій до вертикалі, без надмірних деформацій та вторинного злиття в конгломерати.

Більш глибоке уявлення про внутрішню структуру згенерованого факела розпилу та ступінь його монодисперсності дає аналіз диференційного розподілу часток за їх лінійними розмірами. З цією метою за первинними масивами даних бінарних матриць було побудовано гістограми розподілу часток яка представлено на рис. 4.7.

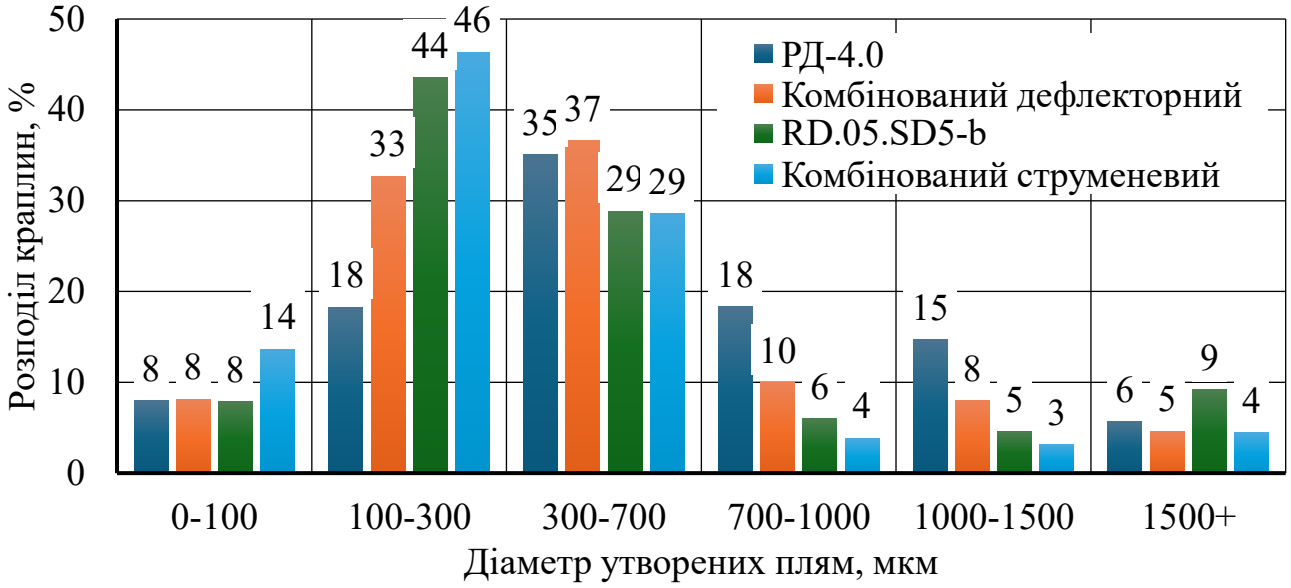


Рисунок 4.7 – Гістограма диференціального розподілу відбитків часток за лінійними розмірами

Аналіз топології представленої гістограми свідчить про візуальний розподіл на три зони, кожна з яких має своє фізичне та агротехнічне обґрунтування.

Цільовий інтервал згідно вимог зосереджений в межах від 300 до 700 мкм і у відсоткому співвідношені займає 55–75% від загальної кількості плям. Дрібнодисперсна фракція 100 мкм та менше. миттєво піддається парусному знесенню польовим вітром та інтенсивному випаровуванню, що призводить до втрат діючої речовини. Грубодисперсна фракція це частки понад 1000 мкм. З агротехнічної точки зору ця фракція є найбільш критичною, краплі такого розміру мають надмірну кінетичну енергію та масу, внаслідок чого вони не утримуються на архітектоніці рослини, а миттєво стікають з листкової поверхні на ґрунт, викликаючи перевитрату добрив та локальне екологічне навантаження.

Наступни кроком було дослідження впливу швидкості руху агрегату на показники яксоті внесення у діапазоні від 2,6 до 3,8 м/с, це дозволить встановити залежність рівня втрат добрив від режиму експлуатації. Реєстрацію швидкості руху агрегату під час польових випробувань здійснювали за допомогою GPS-навігації, що забезпечило фіксацію швидкісних режимів із мінімальною похибкою. За основу було

взято проведено базовий експеримент зі швидкістю 2,6 м/с для розробленого розпилювача (рис. 4.6), і відповідно ми приймаємо втрати добрив за нього 0,00% Результати втрат добрив залежно від швидкості руху агрегату наведені в табл. 4.4

Таблиця 4.4 – Показники роботи та втрати добрив залежно від швидкості руху агрегату

Показник	Втрати добрив, %				
Швидкість руху агрегату, м/с	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
Серійний	1,02	1,33	1,64	1,91	2,23
Розроблений	0,00	0,27	0,56	0,91	1,32

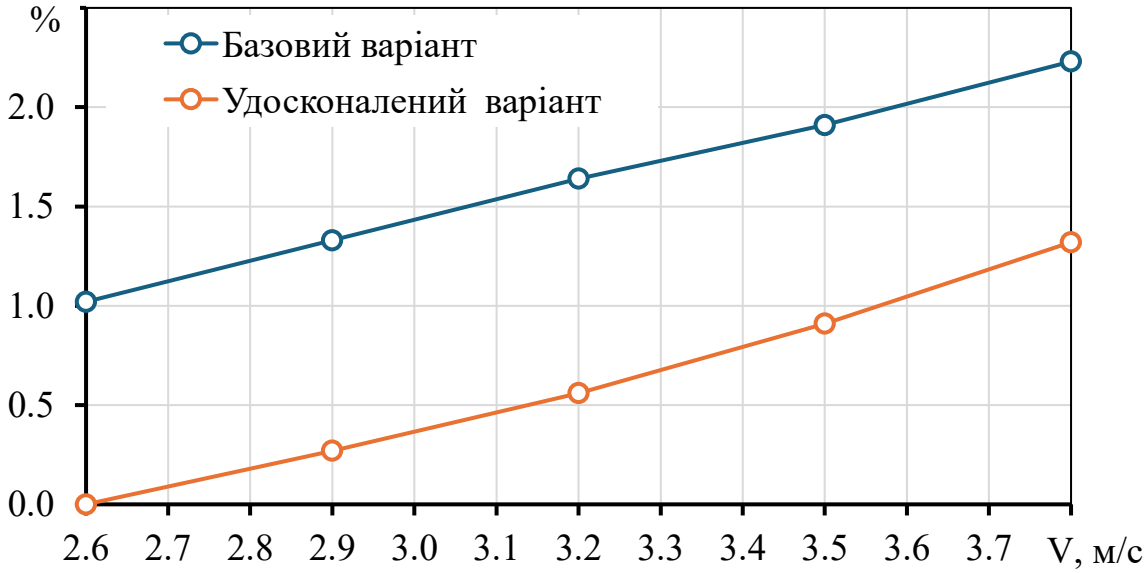


Рисунок 4.8 – Залежність втрат добрив від швидкості руху агрегату

Експериментальні дані засвідчили такі закономірності (рис. 4.8): найменші значення втрат добрив зафіксовано за найнижчої швидкості руху 2,6 м/с, де вони становили 1,02% для серійного розпилювача. Зі збільшенням швидкості руху агрегату до 3,8 м/с показники втрат зростали для обох варіантів: для серійного виконання втрати збільшилися до 2,23%, тоді як для розробленого пристрою цей показник зріс лише до 1,32%. Отримані результати підтверджують, що підвищення швидкості руху понад 2,6 м/с призводить до погіршення рівномірності розподілу робочої рідини, проте розроблений комбінований пристрій стабільно забезпечує нижчі показники

втрат добрив у всьому досліджуваному діапазоні швидкостей порівняно із серійним аналогом.

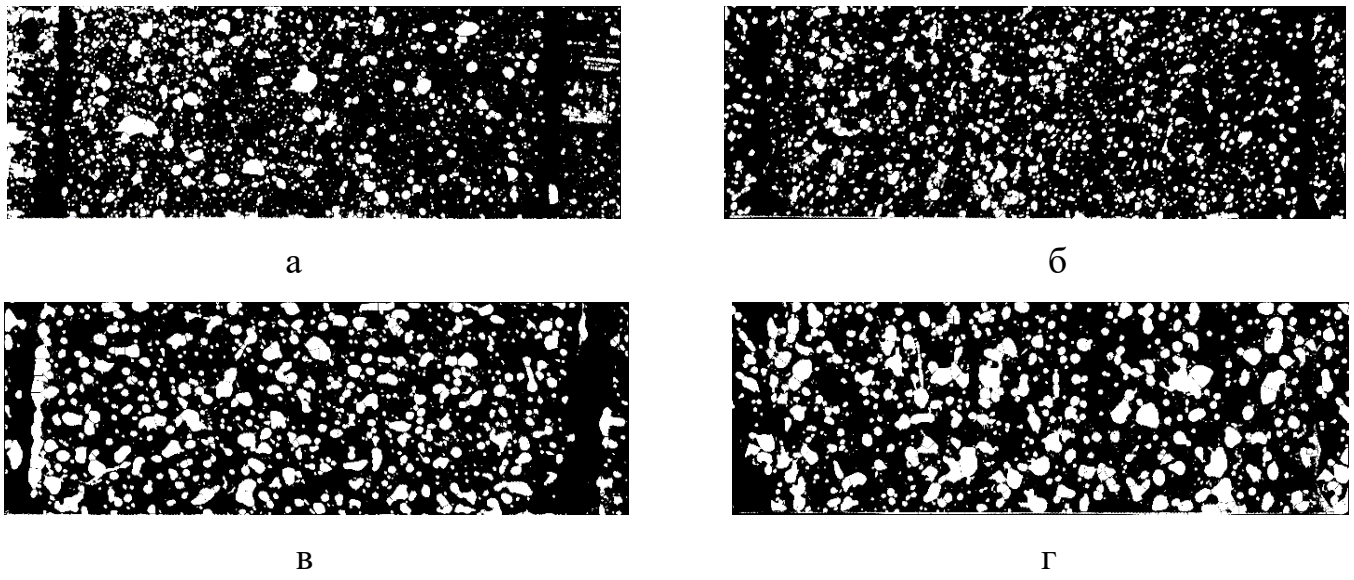
Таким чином, отримані експериментальні дані підтверджують, що в реальних польових умовах на дисперсний склад потоку суттєво впливають деструктивні чинники середовища. Проте для чіткого розмежування конструктивних переваг розробленого комбінованого пристрою від випадкових атмосферних завад і встановлення істинного гідродинамічного потенціалу розпаду рідини виникла необхідність проведення ізольованого етапу досліджень.

З метою верифікації теоретичних передумов та диференціації впливу конструктивних параметрів розпилювальних пристроїв від екзогенних (зовнішніх) завад було реалізовано серію порівняльних випробувань на базі спеціалізованого лабораторно-стенду типу «Рухоме-поле». Проведення експерименту в ізольованому просторі стенда за аналогічною польовою методикою (детально викладена в розділі 3.3) із застосуванням штучних індикаторів (Water-Sensitive Paper) дозволило отримати основні показники (табл. 4.3) за повної відсутності вітрового навантаження, вібрацій та випаровування часток, а також порівняти їх з результатами польвих досліджень

Отримані для кожного з розпилювачів бінарні матриці відсканованих зразків, після осідання краплин на вологочутливий папір наведені на рис. 4.9.

Зведені статистичні, геометричні та топологічні параметри виявлених плям, розраховані на основі каліброваних масивів даних бінарних матриць (рис. 4.9), наведено в таблиці 4.5. Структура представлених даних повністю синхронізована з показниками польових випробувань (табл. 4.3), що дозволяє провести пряме математичне порівняння та встановити коефіцієнти трансформації дисперсного спектра під впливом навколишнього середовища.

Зіставлення числових масивів таблиць 4.3 та 4.5 дозволило вперше кількісно оцінити ступінь чутливості та аеродинамічної деформації факела розпилу кожної з досліджуваних конструкцій при переході від стендових до експлуатаційних умов роботи.



а б

в г

Рисунок 4.8 – Бінарні відбитки роботи розпилювачів за відстуності зовнішніх факторів:

а – РД-4,0; б – дефлекторний; в – RD.05.SD5-b; г – струменевий

Таблиця 4.5 – Результати аналізу бінарних відбитків за еталонних умов в середовищі ImageJ

Показник	Бінарний відбиток			
	(рис. 4.8, а)	(рис. 4.8, б)	(рис. 4.8, в)	(рис. 4.8, г)
Загальна кількість відбитків, шт	2047	2442	1160	1356
Кількість відбитків на 1 см^2, шт	95–105	118–126	55–62	68–75
Коефіцієнт покриття поверхні, %	29,3	33,8	25,9	28,1
Середня площа відбитка, мм^2	0,28	0,31	0,43	0,48
Середній діаметр Фере, мкм	645	610	750	691
Коефіцієнт круговості	0,36	0,32	0,38	0,42
Індекс монолітності	0,83	0,80	0,83	0,82

1. Аеродинамічна деструкція потоку промислових серійних розпилювачів (колонки «а» та «в»).

Порівняльний аналіз свідчить про значний математичний розрив між еталонними та польовими показниками для обох базових серійних варіантів.

Для серійного дефлекторного розпилювача РД-4,0 (колонка «а») в ізольованих умовах стенда зафіксовано високу щільність часток на 1 см² (95-105 шт.) та середню

площу відбитка 0,28 мм². Проте в польових умовах під дією зустрічного повітряного потоку та вітру кількість ідентифікованих плям знижується до 84–92 шт/см², а середня площа зменшується до 0,20 мм² внаслідок знесення дрібнодисперсної фракції. Це інструментально доводит незадовільну адаптивність серійної дефлекторної схеми: за наявності польового вітру тонка рідка плівка хаотично зривається з екрана, утворюючи нестабільний полідисперсний спектр, де найдрібніші краплі миттєво втрачаються, не досягаючи цільової поверхні.

Промисловий струменевий розпилювач RD.05.SD5-b (колонка «в») продемонстрував аналогічну високу залежність від зовнішніх завад. В еталонних умовах стенда він генерує концентровані макрострумини з кількістю відбитків 55–62 шт. на 1 см² (середня площа 0,43 мм²), проте в реальному полі кількість плям хаотично зменшується до 38–45 шт. на 1 см², тоді як середня площа відбитка зростає до 0,59 мм². Таке розмивання геометричних параметрів доводить, що струменева технологія у польових умовах призводить до значного смугового покриття з високим ступенем випадкового злиття крапель, через що зони надмірного осадження рідкого добрива межують із великими незахищеними ділянками.

2. Експлуатаційна стабільність та адаптивність розроблених технічних рішень (колонки «б» та «г»).

Принципово інша картина встановлена при аналізі даних, що характеризують роботу запропонованого пристрою. Порівняння стендових відбитків із польовими зразками виявило високий ступінь збігу їх диференціальних кривих розподілу та загальну геометричну стабільність плям.

Модифікований дефлекторний розпилювач (колонка «б») як у лабораторних (118–126 шт. на 1 см²), так і в польових (110–118 шт. на 1 см²) умовах стабільно забезпечує найвищу щільність покриття. Незначна варіація параметрів форми (коефіцієнт круговості 0,32 на стенді та 0,52 в полі) доводить, що первинне коригування геометрії робочих органів дозволило суттєво підвищити якість розподілу та адаптувати факел до умов відкритого агрофону.

Комбінований струменевий пристрій (колонка «г») продемонстрував найвищу експлуатаційну стабільність геометричних характеристик. Зіставлення результатів

табл. 4.3 та табл. 4.4 свідчить, що при переході від ідеальних умов стенда до реального польового проходу щільність потоку (68–75 шт/см² на стенді проти 72–77 шт/см² у полі), середня площа відбитка (0,48 мм² проти 0,50 мм²) та лінійні діаметри за Фере (691 мкм проти 650 мкм) змінюються мінімально – у межах допустимої статистичної похибки експерименту (5–7%). Ядро спектра розпилу комбінованого пристрою в обох середовищах стабільно концентрується всередині раціонального агротехнічного вікна 300–700 мкм. Показник монолітності відбитків для розробки в обох серіях дослідів стійко утримується на високому рівні (0,82 та 0,80 відповідно), що підтверджує стійкість процесу диспергування до деформаційного злиття крапель під впливом динамічного опору повітря.

3. Фізичне обґрунтування отриманого адаптивного ефекту.

Здатність розроблених технічних рішень успішно трансформувати потенціал гідродинамічного подрібнення в гарантовану якість реального польового внесення обумовлена їх конструктивними особливостями.

Попереднє дроселювання потоку робочої рідини та оптимізація кута набігання потоку на дефлекторний екран забезпечують формування стабілізованого газорідинного факела. Згенеровані краплі набувають раціональної маси, оптимального розміру та підвищеної інерційності. Це робить їх динамічно стійкими до турбулентних завихрень за обприскувачем і пульсацій вітру на швидкості руху до 10–12 км/год. Як наслідок, частки здійснюють удар об цільову поверхню по траєкторії, близькій до вертикальної, що повністю нівелює деструктивний вплив аеродинамічних факторів відкритого агрофону та забезпечує високу ідентичність польових результатів до еталонних стендових умов.

Результати порівняльного аналізу двох етапів досліджень інструментально підтвердили високу працездатність та експлуатаційну надійність розробленого комбінованого пристрою, який, на відміну від серійних промислових аналогів, є високоадаптивним до мінливих умов навколишнього середовища.

4.4 Порівняння результатів експериментальних досліджень із чисельним моделюванням

Для оцінювання відповідності результатів чисельного моделювання експериментальним дослідженням проведено порівняння отриманих рівнянь регресії для коефіцієнта варіації інтенсивності факела ψ – рівняння (2.43) і (4.8), (2.49) і (4.6) (рис. 4.9). Оцінювання виконувалося за структурою математичних моделей, напрямком та величиною впливу основних факторів d, h, p, а також характером їх квадратичних і взаємодійних ефектів.

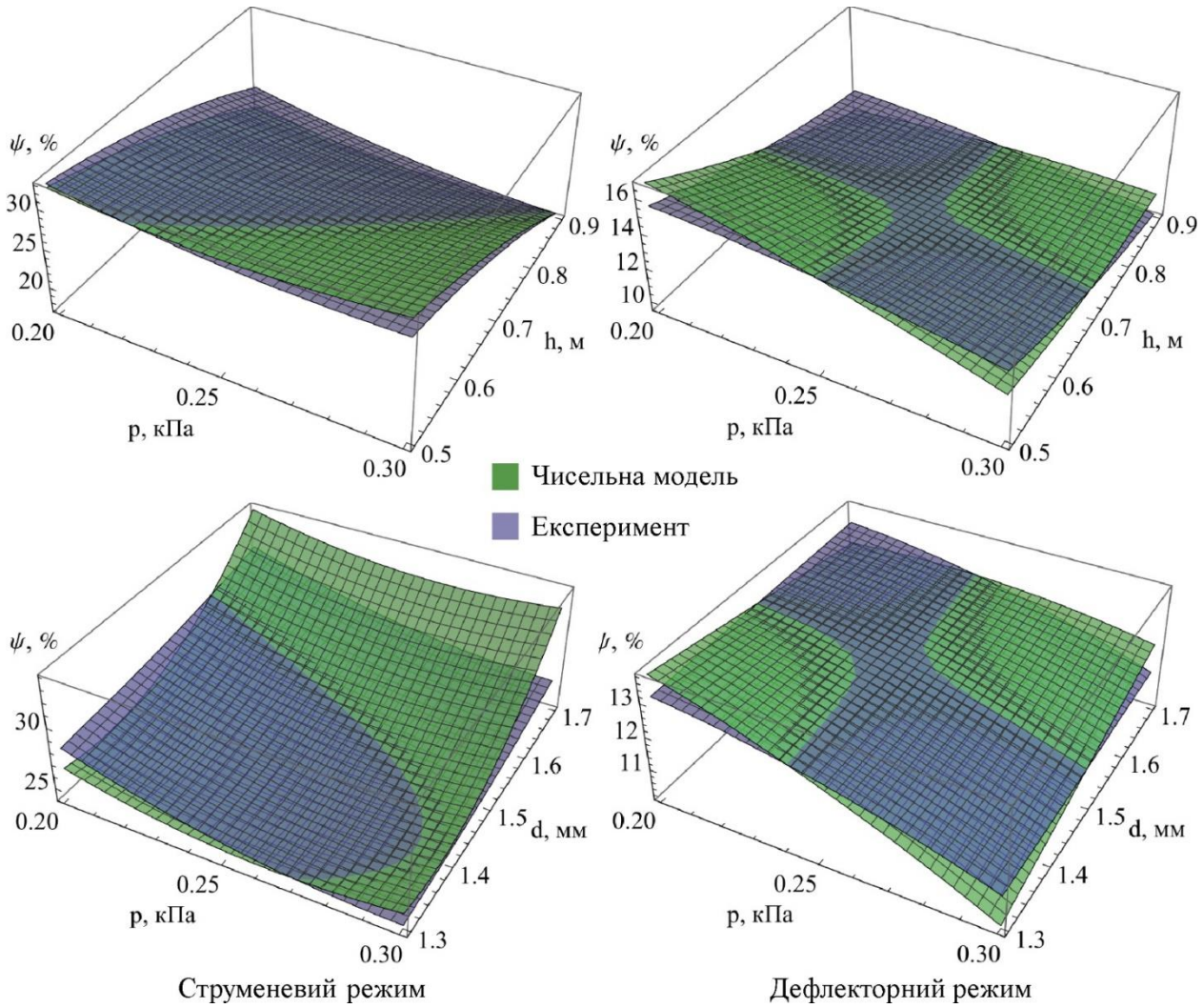


Рисунок 4.9 – Залежність коефіцієнту варіації інтенсивності факела ψ комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив від тиску p, висоти штанги h, діаметра дроселя d

Найвищу відповідність встановлено для комбінованого розпилювача в струменевому режимі. Чисельна та експериментальна моделі мають практично ідентичну структуру та відтворюють однакові закономірності зміни коефіцієнта варіації інтенсивності факела. Зокрема, в обох моделях присутні лінійні та квадратичні складові факторів d, h і p, а також взаємодії dh та hp. При цьому напрямок дії відповідних коефіцієнтів повністю збігається.

Так, для діаметра дроселя d в чисельній моделі коефіцієнти при лінійній та квадратичній складових становлять відповідно −23,019 та +12,022, тоді як в експериментальній моделі — −14,65 та +8,91. Отже, обидві моделі описують нелінійний характер впливу діаметра дроселя, за якого його збільшення спочатку сприяє зменшенню ψ, а після досягнення певної області значень подальше збільшення параметра призводить до зростання коефіцієнта варіації.

Для висоти штанги h також спостерігається повна відповідність за характером впливу. Чисельна модель містить коефіцієнти +30,9028 при h та −27,78 при h^2, а експериментальна – +42,79 та −33,02 відповідно. Таким чином, обидві моделі підтверджують існування екстремального характеру залежності ψ = f(h) та наявність раціональної області висоти розташування розпилювача, за якої забезпечується підвищення рівномірності розподілу робочої рідини.

Найбільш показовою є відповідність за робочим тиском p. У чисельній моделі коефіцієнти при p і p^2 становлять −218,33 та +488,89, тоді як в експериментальній – −191,3 та +401,6. В обох випадках спостерігається однакова закономірність: збільшення тиску в початковій області сприяє зменшенню коефіцієнта варіації, однак його подальше підвищення призводить до зростання ψ. Отже, чисельна модель не лише правильно відтворює напрямок впливу тиску, а й підтверджує наявність раціональної області його значень.

Особливо важливим є збіг взаємодій факторів. В обох моделях коефіцієнт при dh має від'ємний знак: −8,0833 у чисельній та −6,75 в експериментальній моделі. Аналогічно взаємодія hp має від'ємний знак – −56,67 та −59,9 відповідно. Це свідчить про те, що взаємний вплив висоти штанги, діаметра дроселя та робочого тиску однаково відтворюється чисельною моделлю та підтверджується експериментально.

Суттєвою ознакою відповідності є також близькість абсолютних значень регресійних коефіцієнтів. Для основних факторів відмінності між чисельними та експериментальними коефіцієнтами не змінюють характеру залежностей і не призводять до зміни положення області раціональних значень факторів. Отже, чисельна модель правильно відтворює не лише загальну тенденцію, а й нелінійну структуру процесу формування факела.

Для дефлекторного режиму відповідність є менш вираженою. Чисельна модель правильно відображає нелінійний характер впливу окремих параметрів, зокрема наявність квадратичних складових h^2 та p^2, однак за робочим тиском та взаємодіями dp і hp спостерігаються суттєві відмінності від експериментальної моделі. Це може бути пов'язано зі складнішим механізмом формування факела внаслідок удару струменя об дефлектор, утворення та розтікання рідинної плівки, її відриву від криволінійної поверхні та подальшого диспергування.

За результатами статистичного зіставлення прогнозованих значень моделей коефіцієнт кореляції між чисельними та експериментальними значеннями (2.43) і (4.8) становить близько $r = 0{,}997$, що відповідає дуже тісному статистичному зв'язку. Коефіцієнт детермінації при порівнянні прогнозів становить приблизно $R^2 = 0{,}876$. Отже, близько 87,6 % варіації експериментальних значень пояснюється відповідністю чисельної моделі в межах проведеного порівняння. Отримані результати підтверджують високу прогностичну здатність чисельної моделі для струменевого режиму.

За результатами статистичного зіставлення прогнозованих значень моделей коефіцієнт кореляції між чисельними та експериментальними значеннями (2.49) і (4.6) становить близько $r = 0{,}871$, що відповідає дуже тісному статистичному зв'язку. Коефіцієнт детермінації при порівнянні прогнозів становить приблизно $R^2 = 0{,}759$. Отже, близько 75,9 % варіації експериментальних значень пояснюється відповідністю чисельної моделі в межах проведеного порівняння. Отримані результати підтверджують високу прогностичну здатність чисельної моделі для струменевого режиму.

Таким чином, максимальна відповідність чисельного моделювання експериментальним результатам встановлена для струменевого режиму роботи комбінованого розпилювача. Високий рівень відповідності підтверджується збігом структури регресійних моделей, однаковими знаками основних, квадратичних та взаємодійних коефіцієнтів, а також близькими значеннями їх абсолютних величин. Це дає підстави вважати, що застосована чисельна модель адекватно відтворює фізичні закономірності формування струменевого факела та може бути використана для прогнозування коефіцієнта варіації, визначення раціональних параметрів розпилювача та попередньої оптимізації його конструкції без проведення повного обсягу натурних експериментів.

Водночас для дефлекторного режиму чисельне моделювання доцільно розглядати передусім як інструмент встановлення загальних закономірностей і вибору області раціональних параметрів, тоді як остаточне визначення оптимальних режимів потребує експериментальної верифікації.

4.5 Висновки з розділу

1. За результатами лабораторних експериментальних досліджень підтверджено працездатність розробленого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив та встановлено закономірності формування його гідродинамічних характеристик. Візуальними дослідженнями встановлено, що за робочого тиску 0,20–0,30 МПа пристрій забезпечує стабільне та симетричне формування факела розпилу з плавним перекриттям суміжних факелів, тоді як за тиску 0,15 МПа спостерігається нестабільне диспергування та витікання рідини у вигляді суцільних струменів. Перевіркою герметичності підтверджено відсутність підтікань у місцях спряження конструктивних елементів у досліджуваному діапазоні тиску. Встановлено, що хвилинна витрата робочої рідини закономірно зростає зі збільшенням робочого тиску та діаметра дросельного отвору. Відхилення витратних характеристик комбінованого пристрою порівняно із серійними розпилювачами РД-4,0 та RD.05.SD5-b становило відповідно 2,3–3,2 та 1,7–3,1 %, що не перевищує

допустимого значення ±5 % та підтверджує стабільність його гідравлічних характеристик.

2. За результатами багатофакторних експериментальних досліджень отримано математичні моделі другого порядку, що описують залежність коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини ψ від робочого тиску p, висоти розташування штанги h та діаметра змінного дроселя d для серійних і розроблених комбінованих розпилювачів. Перевірка моделей за критеріями Кохрена, Стьюдента та Фішера підтвердила однорідність дисперсій, статистичну значущість коефіцієнтів та адекватність отриманих рівнянь, що свідчить про достовірність встановлених закономірностей. Аналіз поверхонь відгуку показав суттєвий взаємопов'язаний та нелінійний вплив досліджуваних факторів на рівномірність поперечного розподілу рідини. Визначено раціональні параметри роботи пристрою, за яких для комбінованого дефлекторного розпилювача коефіцієнт варіації становить ψ = 9,37% при p = 0,30 МПа, h = 0,90 м та d = 1,0 мм, що на 10,8% менше порівняно із серійним РД-4,0 (ψ = 10,5%). Для комбінованого струменевого розпилювача отримано ψ = 16,8% при p = 0,30 МПа, h = 0,90 м та d = 1,2 мм, що на 11,1% менше порівняно з серійним RD.05.SD5-b (ψ = 18,9%). Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої конструкції та доцільність її подальшого дослідження в польових умовах.

3. Результати польових досліджень підтвердили працездатність та експлуатаційну ефективність розробленого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив в умовах дії неконтрольованих зовнішніх факторів. За робочої швидкості агрегату 10 км/год, температури повітря 14°C та швидкості вітру до 5 м/с комбінований дефлекторний пристрій забезпечив щільність покриття 110–118 шт/см² порівняно з 84–92 шт/см² у серійного РД-4,0, а комбінований струменевий – 72–77 шт/см² порівняно з 38–45 шт/см² у серійного RD.05.SD5-b. При цьому коефіцієнт покриття поверхні для дефлекторного пристрою становив 30,8 %, а для струменевого – 28,9 %, що перевищує відповідні показники серійних аналогів (25,6 та 24,2 %). Встановлено, що розроблений пристрій забезпечує формування краплин переважно раціонального для внесення рідких мінеральних добрив діапазону 300–

700 мкм, частка якого за результатами аналізу становить 55–75% загальної кількості відбитків. Для комбінованих пристроїв середній діаметр за Фере становив 586 мкм для дефлекторного та 650 мкм для струменевого виконання. Індекс монолітності відбитків становив відповідно 0,83 та 0,80, що характеризує стабільність форми сформованих плям. Для комбінованого дефлекторного пристрою коефіцієнт круговості підвищився до 0,52 порівняно з 0,36 у серійного РД-4,0, що свідчить про більш стабільну форму відбитків крапель у польових умовах. Порівняння польових і стендових результатів також показало вищу стабільність характеристик комбінованого струменевого пристрою, для якого щільність покриття, середня площа відбитка та середній діаметр за Фере змінилися незначно. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої конструкції для підвищення стабільності та рівномірності внесення рідких мінеральних добрив в умовах реальної експлуатації.

4. Порівняння результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень (2.43) і (4.8), (2.49) і (4.6) підтвердило високу відповідність розробленої чисельної моделі реальному процесу формування факела. Для струменевого режиму отримано $r = 0{,}997$ та $R^2 = 0{,}876$, що свідчить про дуже тісний статистичний зв’язок і пояснює 87,6% варіації експериментальних значень. Для дефлекторного режиму відповідність також є високою: $r = 0{,}871$, $R^2 = 0{,}759$, тобто модель пояснює 75,9% варіації експериментальних даних. Таким чином, чисельне моделювання адекватно відтворює основні закономірності формування факела та може використовуватися для прогнозування коефіцієнта варіації, визначення раціональних параметрів розпилювача і попередньої оптимізації його конструкції. Найвища відповідність встановлена для струменевого режиму.

Основні наукові здобутки розділу підтверджені публікаціями автора [165, 183–186].

5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Впровадження результатів досліджень

Розроблений пристрій для внесення рідких мінеральних добрив пройшов успішну виробничу перевірку у ФОП «Боханченко І. С.» (Харківська обл., Берестинський р-н, с. Малі Бучки) під час передпосівного внесення карбамід-аміачної суміші (КАС-32) (додаток Е). Виробничі випробування підтвердили високу ефективність роботи агрегату за швидкості руху 2,6–3,8 м/с та швидкості вітру до 6 м/с. Зокрема, застосування пристрою забезпечило зниження коефіцієнта варіації поперечного розподілу робочої рідини (ψ) у струменевому режимі на 2,1%, а в дефлекторному – на 1,13% порівняно з базовими серійними аналогами. Завдяки стабілізації факела розпилу та утворенню крапель в оптимальному діапазоні (300–700 мкм) досягнуто зменшення втрат добрив від випаровування та знесення вітром на 1,02–2,23%.

На базі фермерського господарства ФГ «ЛАРІНИ» (ЄДРПОУ 20259349, Дніпропетровська обл., Дніпровський р-н, с. Василівка) було виготовлено дослідну партію розроблених комбінованих пристроїв у кількості 40 одиниць для дообладнання штангового обприскувача господарства. Вироби пройшли повний цикл контрольної збірки, стендової перевірки та практично підтвердили здатність забезпечувати задану норму й підвищену рівномірність внесення добрив за підвищених робочих швидкостей (додаток Е).

Результати науково-технічної розробки, виконаної в межах держбюджетної тематики «Підвищення ефективності механізації технологічних процесів у рослинництві шляхом розробки та впровадження енергетичних засобів і машин для реалізації концепції точного землеробства» (№ ДР 0125U002952), передано до ТОВ «Агромодуль» (м. Дніпро). Підприємством прийнято дослідний зразок та комплект конструкторської документації на комбінований пристрій. ТОВ «Агромодуль» висловило зацікавленість у випуску дослідної серії таких пристроїв обсягом 30

одиниць з метою їх подальших випробувань і підготовки серійного виробництва (додаток Е).

Наукові та практичні результати роботи впроваджено в навчальний процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) на кафедрі тракторів і сільськогосподарських машин (додаток Е):

– у курс дисципліни «Сільськогосподарські машини» для здобувачів бакалаврського рівня спеціальності «Агроінженерія» додано вивчення будови та налаштування розробленого пристрою (з використанням матеріальної бази, створеної здобувачем) у межах лабораторної роботи «Машини для захисту рослин»;

– у дисципліну «Моделювання технологічних процесів в агроінженерії» для бакалаврів впроваджено практичну роботу «Цифровий аналіз відбитків крапель» із використанням програмного середовища Fiji (ImageJ);

– у курс дисципліни «Інжиніринг технічних систем в галузі рослинництва» для магістрів спеціальності «Машинобудування» додано завдання до лабораторної роботи з експериментального визначення рівномірності поперечного розподілу робочої рідини в лабораторних умовах.

5.2 Техніко-економічна ефективність

Техніко-економічну оцінку ефективності використання розробленого комбінованого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив у складі штангового обприскувача виконано на основі загальноприйнятих нормативно-методичних підходів [189-191] та експериментальних даних, отриманих під час лабораторних і польових випробувань (розділи 4.1-4.3).

Замість стандартних розпилювачів на штангу обприскувача встановлювався розроблений комбінований пристрій. Розрахунок балансової вартості пристрою наведено в табл. 5.1. Загальна кількість пристроїв, необхідних для оснащення серійного штангового обприскувача ОП-24 становить 48 одиниць.

Таблиця 5.1 – Балансова вартість розробленого комбінованого пристрою

Найменування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
SLA 3D-друк розпилювача	50	150*	7500
Гвинт кріпильний	50	5	250
Ущільнювальні кільця	50	3	150
Змінні дроселі	150	20	3000
Байонетне кріплення	48	90	4320
Проливка розпилювачів	50	30	1800
Всього			17020

*вартість станом на 21.03.2026

Оцінку економічної ефективності реалізовано на основі даних, отриманих під час польових випробувань та підтверджених актом про виробничу перевірку (Додаток Е). Алгоритм розрахунків охоплював визначення комплексу техніко-економічних критеріїв: балансової вартості запропонованого пристрою (грн); амортизаційних відрахувань (грн/га); витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт (грн/га); витрат на паливно-мастильні матеріали (грн/га); трудових витрат (грн/га); сукупних витрат на одиницю площі (грн/га); динаміки загальних витрат порівняно з базовим варіантом (грн/га); чистого економічного ефекту (грн/га).

Вихідні параметри, необхідні для проведення техніко-економічного аналізу, наведено в табл. 4.4, 5.2.

Повний розрахунок економічної оцінки представлено в таблиці додатка Ж. Для візуалізації отриманих даних побудований графік залежності питомих експлуатаційних витрат від швидкості руху агрегату (рис 5.1).

Результати розрахунків свідчать, що використання розробленого комбінованого пристрою до штангового обприскувача під час внесення карбамід-аміачної суміші та інших рідких мінеральних добрив забезпечує одержання питомого річного економічного ефекту на рівні 44 грн/га порівняно з базовим серійним варіантом. Зазначений ефект досягається передусім завдяки підвищенню рівномірності поперечного розподілу робочої рідини, оптимізації дисперсного складу крапель у

межах 300–700 мкм, зменшенню втрат добрив за рахунок зносу (дрейфу), випаровуванню.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані до економічного розрахунку

Найменування	Варіант	
	Базовий	Удосконалений
Баланосва вартість трактора, грн	800000	800000
Балансова вартість обпрсикувача, грн	450000	467020
Ширина захвату обприскувача, м	24	24
Коефіцієнт використання часу зміни	0,8	0,8
Кількість обслуговуючого персоналу, люд.	1	1
Погодинна ставка оплати по відповідному розряду, грн./год*	188	188
Годинна витрата палива, кг/год	12,40	12,40
Ціна одного кілограму палива, грн/кг*	82,0	82,0

* станом на 21.03.2026

Зі збільшенням робочої швидкості (рис. 5.1) спостерігається інтенсивне зростання економічної ефективності і досягає своїх пікових значень 44 грн/га при швидкості 3.2 м/с (12 км/год) завдяки підвищенню змінної продуктивності обприскувача та скороченню питомих трудових і енергетичних витрат на одиницю площі.

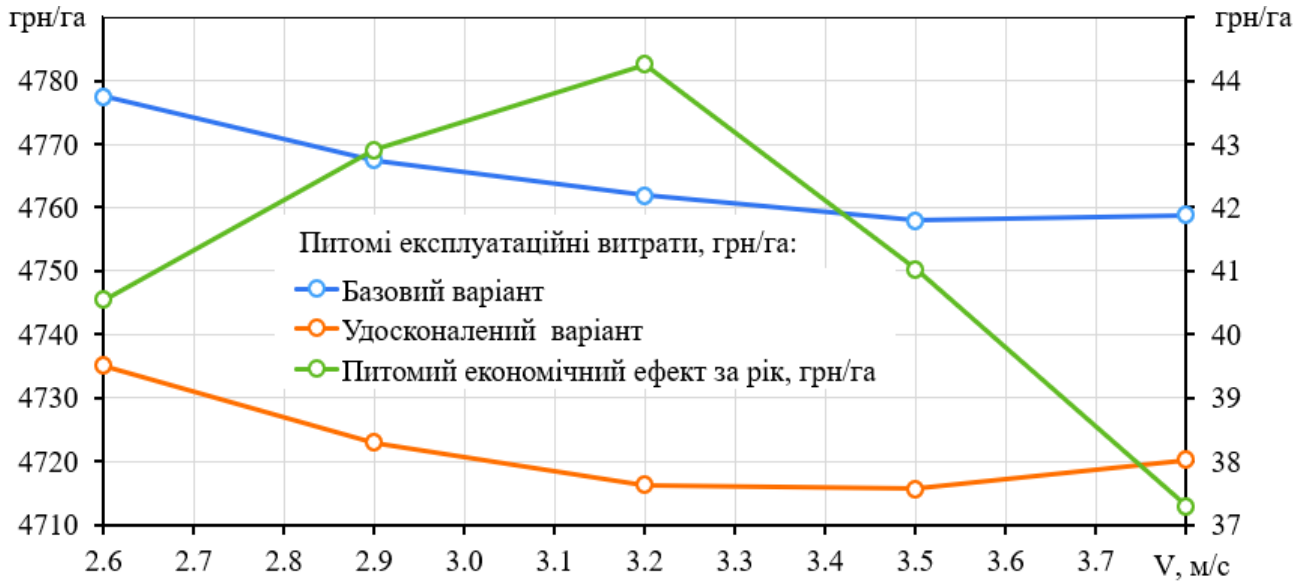


Рисунок 5.1 – Графік залежності експлуатаційних від швидкості руху агрегату

За результатами розрахунків встановлено, що термін окупності додаткових капітальних вкладень за умов оснащення обприскувача розробленими пристроями на базовій площі обробітку 200 га досягається протягом першого виробничого сезону (термін окупності становить 0,22 року).

5.3 Висновки з розділу

На основі проведених досліджень та виробничої перевірки розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив (КАС-32) у ФОП «Боханченко І. С.» підтверджено його високу ефективність за швидкості руху 2,6–3,8 м/с і вітру до 6 м/с, що забезпечило зниження коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини на 2,1% у струменевому режимі та на 1,13% у дефлекторному, а також зменшення втрат добрив від випаровування та знесення на 1,02–2,23% завдяки стабілізації факела та формуванню крапель оптимального діаметра 300–700 мкм. На базі ФГ «ЛАРІНИ» виготовлено дослідну партію із 40 комбінованих пристроїв для дообладнання штангового обприскувача, які пройшли стендову перевірку, тоді як результати розробки в межах держбюджетної тематики № ДР 0125U002952 передано до ТОВ «Агромодуль» (м. Дніпро) для підготовки серійного випуску серії з 30 одиниць. Окрім цього, практичні та наукові результати роботи успішно інтегровано в освітній процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) для підготовки здобувачів за спеціальностями «Агроінженерія» та «Машинобудування».

Техніко-економічна оцінка використання розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив показала, що його застосування забезпечує отримання питомого річного економічного ефекту на рівні 44 грн/га порівняно з базовим серійним варіантом за рахунок підвищення рівномірності поперечного розподілу рідини, оптимізації дисперсного складу крапель та зменшення втрат добрив від зносу і випаровування. Максимальної ефективності агрегат досягає при робочій швидкості 3,2 м/с (12 км/год), а додаткові капітальні вкладення повністю окупаються протягом першого ж виробничого сезону (термін окупності становить 0,22 року за базової площі обробітку 200 га).

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності та якості внесення рідких мінеральних добрив шляхом розроблення й наукового обґрунтування конструктивно-режимних параметрів комбінованого розпилювача з дефлекторним і струменевим режимами роботи на основі чисельного та експериментального дослідження процесу формування факела розпилу.

1. Проведений аналіз підтвердив перспективність удосконалення технологій внесення рідких мінеральних добрив. Встановлено, що підвищення їх ефективності значною мірою залежить від якості формування факела розпилення, рівномірності розподілу рідини та конструктивно-режимних параметрів розпилювальних пристроїв. Патентно-інформаційний аналіз підтвердив, що ефективність процесу визначається параметрами, які впливають на дисперсність крапель, рівномірність розподілу та втрати від дрейфу, що обґрунтовує необхідність створення універсального розпилювача, здатного адаптуватися до різних умов внесення. Запропоновано конструктивно-технологічну схему комбінованого розпилювача з двома режимами роботи – дефлекторним та струменевим, що забезпечує кероване формування факела, регулювання дисперсності та підвищення рівномірності внесення робочої рідини. Розроблена конструкція є сумісною з існуючими штанговими обприскувачами та створює основу для подальшої оптимізації її конструктивно-режимних параметрів.

2. У результаті теоретичних досліджень обґрунтовано підхід до чисельного моделювання процесу формування факела комбінованого розпилювача із застосуванням удосконаленої Ейлерово–Лагранжевої моделі ELSA у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Запропонований динамічний перехід від ейлерової до лагранжевої фази за критеріями сферичності та характерного діаметра крапель забезпечує адекватний опис первинного руйнування суцільного струменя та подальшого руху дисперсної фази. Сформований фізико-математичний апарат і прийняті критерії переходу створюють основу для чисельного дослідження впливу конструктивних і режимних параметрів розпилювача на коефіцієнт варіації інтенсивності та кут розкриття факела, а також для визначення їх раціональних

значень. Отримана модель була використана як інструмент обґрунтування конструкції та режимів роботи комбінованого розпилювача для забезпечення необхідної якості розподілу робочої рідини.

3. За результатами чисельного моделювання отримано математичні залежності другого порядку для оцінювання коефіцієнта варіації інтенсивності факела ψ та кута його розкриття β залежно від конструктивних і режимних параметрів комбінованого розпилювача. Встановлено нелінійний характер впливу та статистично значущі взаємодії факторів. Для струменевого режиму досліджено вплив кута між струменевими отворами φ, діаметра струменевих отворів δ, кількості отворів N, робочого тиску p, висоти штанги h та діаметра дроселя d. Для дефлекторного режиму встановлено вплив відстані від вихідного каналу до центра кривизни дефлектора l, радіуса кривизни дефлекторної поверхні r, товщини крайки дефлектора t, робочого тиску p, висоти штанги h та діаметра дроселя d. Отримані залежності використано для багатокритеріальної оптимізації за критерієм мінімізації ψ/β, у результаті якої визначено раціональні параметри: для струменевого режиму – φ = 26,6°, δ = 2,2 мм, N = 5; для дефлекторного – l = 3,3 мм, r = 5,8 мм, t = 0,5 мм.

4. Результати лабораторних досліджень підтвердили працездатність розробленого комбінованого пристрою та встановлено закономірності його гідродинамічних характеристик. Визначено, що за робочого тиску 0,20–0,30 МПа пристрій забезпечує стабільне й симетричне формування факела з плавним перекриттям, тоді як за 0,15 МПа спостерігається нестабільне диспергування та витікання суцільними струменями. Встановлено, що хвилинна витрата рідини закономірно зростає зі збільшенням тиску та діаметра дросельного отвору. Відхилення витратних характеристик порівняно із серійними розпилювачами РД-4,0 і RD.05.SD5-b становило відповідно 2,3–3,2 та 1,7–3,1 %, що не перевищує допустимого значення ±5 % і підтверджує стабільність гідравлічних показників.

5. За результатами багатофакторних експериментів отримано математичні моделі другого порядку, що описують залежність коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини ψ від робочого тиску p, висоти розташування штанги h та діаметра змінного дроселя d. Перевірка за критеріями Кохрена, Стьюдента і Фішера

підтвердила однорідність дисперсій, значущість коефіцієнтів та адекватність рівнянь. Аналіз поверхонь відгуку показав нелінійний взаємопов'язаний вплив факторів на рівномірність розподілу. Визначено раціональні параметри: для комбінованого дефлекторного розпилювача ψ = 9,37% при p = 0,30 МПа, h = 0,90 м і d = 1,0 мм (на 10,8% менше, ніж у РД-4,0 ψ = 10,5%), а для струменевого – ψ = 16,8% при p = 0,30 МПа, h = 0,90 м і d = 1,2 мм (на 11,1% менше, ніж у RD.05.SD5-b з ψ = 18,9%). Це доводить ефективність розробленої конструкції та доцільність польових випробувань.

6. Результати польових випробувань підтвердили працездатність та ефективність комбінованого пристрою в умовах дії зовнішніх факторів (швидкість агрегату 10 км/год, температура 14°C, вітру до 6 м/с). Дефлекторний пристрій забезпечив щільність покриття 110–118 шт/см² (проти 84–92 шт/см² у РД-4,0), а струменевий – 72–77 шт/см² (проти 38–45 шт/см² у RD.05.SD5-b). Коефіцієнт поверхневого покриття становив 30,8% (дефлекторний) і 28,9% (струменевий), перевищуючи аналоги (25,6 та 24,2%). Встановлено, що розробка формує краплі раціонального діапазону 300–700 мкм (частка 55–75%). Середній діаметр за Фере становив 586 мкм (дефлекторний) і 650 мкм (струменевий), а індекс монолітності відбитків – 0,83 та 0,80. Коефіцієнт круговості дефлекторного пристрою зріс до 0,52 проти 0,36 у РД-4,0, що свідчить про стабільність форми відбитків. Порівняння зі стендовими даними підтвердило стабільність характеристик струменевого виконання. Отримані результати доводять доцільність застосування конструкції для підвищення якості внесення добрив в умовах збурюючих факторів.

7. На основі проведених досліджень та виробничої перевірки розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив (КАС-32) у ФОП «Боханченко І. С.» підтверджено його високу ефективність за швидкості руху 2,6–3,8 м/с і вітру до 6 м/с, що забезпечило зниження коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини на 2,1% у струменевому режимі та на 1,13% у дефлекторному, а також зменшення втрат добрив від випаровування та знесення на 1,02–2,23% завдяки стабілізації факела та формуванню крапель оптимального діаметра 300–700 мкм. На базі ФГ «ЛАРІНИ» виготовлено дослідну партію із 40 комбінованих пристроїв для дообладнання штангового обприскувача, які пройшли стендову перевірку, тоді як результати

розробки в межах держбюджетної тематики № ДР 0125U002952 передано до ТОВ «Агромодуль» (м. Дніпро) для підготовки серійного випуску серії з 30 одиниць. Практичні та наукові результати роботи успішно інтегровано в освітній процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) для підготовки здобувачів за спеціальностями «Агроінженерія» та «Машинобудування».

8. Техніко-економічна оцінка використання розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив показала, що його застосування забезпечує отримання питомого річного економічного ефекту на рівні 44 грн/га порівняно з базовим серійним варіантом за рахунок підвищення рівномірності поперечного розподілу рідини, оптимізації дисперсного складу крапель та зменшення втрат добрив від зносу і випаровування. Максимальної ефективності агрегат досягає при робочій швидкості 3,2 м/с (12 км/год), а додаткові капітальні вкладення повністю окупаються протягом першого ж виробничого сезону (термін окупності становить 0,22 року за базової площі обробітку 200 га).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Fertilizer Association. *Short-Term Fertilizer Outlook 2024–2025* [Електронний ресурс]. 2024. Режим доступу: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2025/02/2024_ifa_short_term_outlook_report.pdf. Дата звернення: 02.12.2025.

2. Yara International. *Fertilizer Industry Handbook 2025* [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: https://beta.yara.com/... Дата звернення: 02.12.2025.

3. Ludemann, C.I., Gruere, A., Heffer, P. *et al.* Global data on fertilizer use by crop and by country. *Sci Data* 9, 501 (2022). https://doi.org/10.1038/s41597-022-01592-z

4. Gulf Petrochemicals & Chemicals Association (GPCA). *Global fertilizer demand begins its recovery after a rocky two years* / Laura Cross, Director, Market Intelligence, International Fertilizer Association (IFA) [Електронний ресурс]. 2024, 27 вер. Режим доступу: https://gpcachem.org/2024/09/27/global-fertilizer-demand-begins-its-recovery-after-a-rocky-two-years/ Дата звернення: 02.12.2025.

5. Our World in Data. [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: https://ourworldindata.org/ Дата звернення: 02.12.2025.

6. TheGlobalEconomy.com. [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/fertilizer_use/ Дата звернення: 02.12.2025.

7. IndexMundi. [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: https://www.indexmundi.com/facts/ukraine/indicator/AG.CON.FERT.ZS Дата звернення: 02.12.2025.

8. Food and Agriculture Organization of the United Nation. [Електронний ресурс]/ 2025. Режим доступу: https://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/plantnutrition/fertspecs/en/ Дата звернення: 03.12.2025.

9. Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). Soil Fertility and Fertilization: An Introduction to Nutrient Management (8th ed., p. 516). Pearson Prentice Hall.

10. Bohush P., Rusek P., Brodovska M. S. Suspension fertilizers: How to Reconcile Sustainable Fertilization and Environmental Protection. *Agriculture*. 2021. Vol. 11, № 10. Article 1008. DOI: 10.3390/agriculture11101008.

11. 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.

12. 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.

13. Дейкун В. А., Жук Д. Г., Мачок Ю. В. Огляд способів внесення та ефективності застосування мінеральних добрив. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 52. С. 41-47. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.41-47

14. Denmead T., Turner D., Wang Y., Zhang J., Yang Z., Chang C. M., Zhang Q., Chen D., Freney J. Loss of nitrogen by ammonia volatilization and NO_x emission after application of urea to irrigated maize in Shanxi Province, China // 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World: proceedings, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010. Режим доступу: https://www.old.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0748.pdf (дата звернення: 02.12.2025).

15. Gworek B., Łabętowicz J., Kijeńska M., Tokarz L., Barański A. Nitrogen transformations from nitrogen fertilizers in soils of central and eastern Europe in changing climatic conditions. *Soil Science Annual*. 2021. Vol. 72, No. 1, Article 132440. DOI: https://doi.org/10.37501/soilsa/132440.

16. Dydiv O. (2022). The influence of liquid complex fertilizers (lcf 3:18:18) on yield and quality of chinese cabbage. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agronomy*, (26), 105–109. https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.105.

17. Dawar K., Dawar A., Tariq M., Mian I. A., Muhammad A., Farid L., Khan S., Khan K., Fahad S., Danish S., Al-Ghamdi A., Elshikh M. S., Tahzeeb-ul-Hassan M.

Enhancing nitrogen use efficiency and yield of maize (Zea mays L.) through Ammonia volatilization mitigation and nitrogen management approaches // BMC Plant Biology. 2024. Vol. 24. Article 74. DOI: 10.1186/s12870-024-04749-7.

18. Sáez C. Á., Cantón F. R., Forde B. G. Nitrogen use efficiency in plants // *Journal of Experimental Botany*. 2012. Vol. 63, № 14. P. 4993. DOI: 10.1093/jxb/ers214.

19. European Chemicals Agency (ECHA). Guidance on Safe Handling of Nitrogen Fertilizers. Helsinki. ECHA, 2024. Режим доступу: https://echa.europa.eu/ (дата звернення: 03.12.2025).

20. Khavkhun, A. (2024). The impact of mineral fertilisers on the physicochemical properties of soil in maize cultivation. *Plant and Soil Science*, 15(3), 44-53. https://doi.org/10.31548/plant3.2024.44

21. United States Department of Agriculture (USDA). Nitrogen Fertilizer Efficiency Report 2023. Washington: USDA, 2023. Режим доступу: https://www.usda.gov/ (дата звернення: 03.12.2025).

22. Van Loon J., Woltering L., Krupnik T. J. *Precision for Smallholder Farmers: A Small-Scale-Tailored Variable Rate Fertilizer Application Kit*. *Agriculture*. 2018. Vol. 8, no. 4, art. 48. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture8040048.

23. Fountas S., Balafoutis A., van Evert F., et al. *The contribution of precision agriculture technologies to farm management* [Електронний ресурс] // Joint Research Centre, European Commission. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018. 74 p. Режим доступу: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112505/final_technical_report_pat.pdf

24. Singh J., Sandal S. K., Yousuf A., Sandhu P.S. *Effect of Drip Irrigation and Fertigation on Soil Water Dynamics and Productivity of Greenhouse Tomatoes* // *Water*. 2023. Vol. 15, No. 11. Article 2086. DOI: 10.3390/w15112086.

25. Feleafel M. N., Mirdad Z. M., Hassan A. S. Effecte of NPK fertigation rate and starter fertilizer on the growth and yield of cucumber grown in greenhouse. *Journal of Agricultural Science.* 2014. Vol. 6, no. 9, p. 81–92. DOI: 10.5539/jas.v6n9p81.

26. Zakharchenko E., Adamchyk Ye., Yakovets L., Kovalenko N. O., Bahorka M., Yurchenko N., Kovalenko V., Kalnahuz A., Horpynchenko O., Zheldubovskyi M. Agrotechnological and marketing assessment of the use of urea–ammonium nitrate (UAN)

for growing agricultural crops in Ukraine. *Modern Phytomorphology*, 2025, vol. 19, no. 2, pp. 194-199. DOI: 10.5281/zenodo.15301256.

27. IFPRI. Global fertilizer trade 2021–2023: post-war market adjustments. URL: https://southasia.ifpri.info/2024/05/13/global-fertilizer-trade-2021-2023-what-happened-after-war-related-price-spikes/ (дата звернення: 04.12.2025).

28. Дідур, В., В'юник, О., Комар, А. Аналіз способів внесення добрив. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 12(1), 1 з 3. https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v12i1.281.

29. Кобець О.М., Лепеть Є.І. Аналіз способів внесення рідких мінеральних добрив. Наукові основи адаптивного землеробства**:** матеріали Міжнародної науковопрактичної конференції з нагоди 100-річчя від дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора, академіка ФЕДОРА ТРОХИМОВИЧА МОРГУНА, 90-річчя Агрономічного факультету Дніпровського державного аграрно-економічного університету та Міжнародного дня здоров'я рослин (16-17 травня 2024 року, м. Дніпро). Дніпро: ДДАЕУ, 2024. с. 373-374.

30. 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.

31. Сухина А. Методи та способи застосування КАС на практиці. *Пропозиція. Спецвипуск. Сучасна техніка для захисту с.-г. культур.* 2017. С. 22–25.

32. Економічна ефективність використання карбамід-аміачних сумішей (КАС) в сучасних системах удобрення сільськогосподарських культур / С.М. Крамарьов та ін. Дніпро: Нова ідеологія, 2020. 195 с.

33. Дейкун В. А., Жук Д. Г., Мачок Ю. В. Огляд способів внесення та ефективності застосування мінеральних добрив. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2022. № 52, р. 41-47. DOI: 10.32515/2414-3820.2022.52-41-47.

34. Кобець О. М., Пономаренко Н. О., Лепеть Є. І. Стан механізації внесення КАС в Україні. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських

машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 54. С. 77-83. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.77-83

35. Дейкун В. А. Обґрунтування параметрів робочого органа для внутрішньоґрунтового внесення мінеральних добрив: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.11. Кіровоград, 2013.

36. Li X., Wang R., Lou F., Ji P., Wang J., Dong W., Tao P., Zhang Y. Subsoiling Combine with Layered Nitrogen Application Optimizes Root Distribution and Improve Grain Yield and N Efficiency of Summer Maize // *Agronomy*. 2024. Vol. 14, no. 6, art. 1228. DOI: 10.3390/agronomy14061228.

37. Dhaliwal SS, Shukla AK, Behera SK, Dubey SK, Sharma S, et al. 2024. Impact of fertilization and tillage practices on transformations of carbon, essential plant nutrients and microbial biota composition in soils: a review. *Technology in Agronomy* 4: e003 doi: 10.48130/tia-0023-0020.

38. Богуславська сільгосптехніка [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://boguslav.ua/ (дата звернення: 04.12.2025).

39. ТМ «Схід» [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://voshod.ua/(дата звернення: 07.12.2025).

40. ТМ «DEMETRA» [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://demetra-site.com.ua/ (дата звернення: 04.12.2025).

41. АТ «Ельворті» [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://elvorti.com/?lang=ua (дата звернення: 07.12.2025).

42. Evers [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.eversagro.com/ (дата звернення: 07.12.2025).

43. Garant-kotte [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.garant-kotte.de/ (дата звернення: 07.12.2025).

44. Wienhoff [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.wienhoff.de/en/produkte/applikationstechnik/injektionstechnik/ (дата звернення: 07.12.2025).

45. Kverneland [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ien.kverneland.com/sprayers/front-mounted-spray-equipment/kverneland-ixtra-life (дата звернення: 07.12.2025).

46. Yu C., Wang Q., Cao X., Wang X., Jiang S., Gong S. Development and performance evaluation of a precise application system for liquid starter fertilizer while sowing maize. *Actuators*. 2021. Vol. 10, no. 9, art. 221. DOI: 10.3390/act10090221.

47. Liang J., Pan F., Chen J., Zhang H., Ji C. A Precise Simultaneous Sowed Control System for Maize Seed and Fertilizer // *Agriculture*. 2024. Vol. 14, no. 2, art. 192. DOI: 10.3390/agriculture14020192.

48. Васильковська К. В. Системний аналіз конструкцій пневмомеханічних висівних апаратів для точного висіву насіння просапних культур. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. Вип. 48. С. 22-35.

49. Yu C., Wang Q., Cao X., Wang X., Jiang S., Gong S. Development and Performance Evaluation of a Precise Application System for Liquid Starter Fertilizer while Sowing Maize. *Actuators.* 2021. Vol. 10, № 9. P. 221. DOI: 10.3390/act10090221.

50. Väderstad AB. Liquid fertiliser system for Tempo planters. URL: https://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/liquid-fertiliser-system-for-planters (дата звернення: 06.12.2025).

51. John Deere. 2510L Liquid Fertilizer Applicator / ExactRate systems. URL: https://www.deere.com/en/tillage/2510l-liquid-fertilizer-applicator/ (дата звернення: 06.12.2025).

52. Amazone. FT-P / Primera DMC — liquid fertiliser metering into seed furrow. URL: https://amazone.co.uk/en-gb/service-support/for-the-press/press-releases/latest/combined-for-high-outputs--1426868 (дата звернення: 06.12.2025).

53. Kinze Manufacturing. Liquid fertilizer on planters. URL: https://www.kinze.com/liquid-and-dry-fertilizer-on-kinze-planters/ (дата звернення: 06.12.2025).

54. Greate Plains. URL: https://www.greatplainsag.com/uk/products/ (дата звернення: 06.12.2025).

55. Duport, Liquiliser spoke wheel injector. https://www.duport.eu/catalog/414/liquiliser/601/liquiliser__injectors (дата звернення: 06.12.2025).

56. Veles-Agro. VULKAN liquid fertilizer injection unit. URL: https://www.velesagro.com/products/vulkan_liquid_fertilizer_injection_unit/ (дата звернення: 06.12.2025).

57. 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.

58. 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. P. 176–185. DOI: 10.32782/naturaljournal.3.2023.176-185.

59. Кобець О.М., Пономаренко Н.О., Лепеть Є.І. Стан механізації внесення КАС в Україні. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. с. 193-199.

60. Alheidary M. H. R. Spraying Technology and Foliar Application Result in a Smooth Layer of the Spray: a Literature Review. *Basrah Journal of Agricultural Sciences.* 2023. Vol. 36, No 2. P. 334-374. DOI: 10.37077/25200860.2023.36.2.25.

61. Агроном. Тверді та рідкі мінеральні добрива: переваги за рідкими [Електронний ресурс]. Agronom.com.ua. Режим доступу: https://www.agronom.com.ua/tverdi-ta-ridki-mineralni-dobryva-perevagy-za-ridkymy/ (дата звернення: 01.12.2025).

62. Huang L., Wang L., Qiu S., Li X., Zhang Y. Evolution and application of precision fertilizer: a review. *Agronomy*. 2025. Vol. 15. № 8. P. 1939. DOI: 10.3390/agronomy15081939.

63. Costa A.G.F., Martin D.E., Torres U., Floyd W., Fritz B.K., Straw C.M., Bagavathiannan M.V. Nozzle type and spray volume effects on site-specific herbicide

application in turfgrass using a remotely piloted aerial application system // *Weed Technology*. 2025. Vol. 39, Article e43: 1-9. DOI: 10.1017/wet.2025.15.

64. Fritz B.K., Hoffmann W.C., Hoffmann D.W., et al. *Measuring Spray Droplet Size from Agricultural Nozzles Using Laser Diffraction* (methodology & implications). Frontiers in Plant Science. USDA-ARS. 2016.

65. Nuyttens 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. P. 1471-1480.DOI: 10.13031/2013.29127.

66. Liao J., Luo X., Wang P., Zhou Z., O'Donnell C. C., Zang Y., Hewitt A. J. Analysis of the influence of different parameters on droplet characteristics and droplet size classification categories for air-induction nozzle *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 2. Article 256. DOI: 10.3390/agronomy10020256.

67. Wolf W., Heckel O., Kells J., Johnson D., Shankland R. Spray droplet analysis of air-induction nozzles // ASAE Paper 99-1026. 1999. 12 p. URL: https://bae.k-state.edu/faculty/wolf/Papers/ASAE991026.pdf (дата звернення: 09.12.2025).

68. Dai S., Ou M., Du W., Yang X., Dong X., Jiang L., Zhang T., Ding S., Jia W. Effects of sprayer speed, spray distance, and nozzle arrangement angle on low-flow air-assisted spray deposition. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1184244. DOI: 10.3389/fpls.2023.1184244.

69. Musiu E. M., Qi L., Wu Y. Spray deposition and distribution on the targets and losses to the ground as affected by application volume rate, airflow rate and target position. *Crop Protection*. 2019. Vol. 116. P. 170-180. DOI: 10.1016/j.cropro.2018.10.019.

70. Jiao Y., Zhang S., Jin Y., Cui L., Chang C., Ding S., Sun Z., Xue X. Research Progress on Intelligent Variable-Rate Spray Technology for Precision Agriculture. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, No. 6. Art. 1431. DOI: 10.3390/agronomy15061431.

71. Sui R. Performance Assessment of a Variable-Rate Fertilizer Applicator Journal of Agricultural Science. 2019. Vol. 11, No. 2. P. 25–30. DOI: 10.5539/jas.v11n2p25.

72. He, L. Variable Rate Technologies for Precision Agriculture *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies*. Springer International Publishing, 2023. C. 1533–1542. DOI: 10.1007/978-3-030-89123-7_34-3

73. Агроном. Сучасні тенденції в обприскуванні [Електронний ресурс] 2020. URL: https://www.agronom.com.ua/suchasni-tendentsiyi-v-obpryskuvanni/ (дата звернення: 09.12.2025).

74. Солоха М. Технології точного землеробства у системах захисту рослин. Спецвипуск ж. Пропозиція. Сучасна техніка для захисту с-г рослин 2017. С. 26-28.

75. Кобець О.М., Лепеть Є.І. Класифікація та принципи роботи обприскувачів та розбризкувачів. The 12th International scientific and practical conference “European congress of scientific discovery” (November 10-12, 2025) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2025. p. 17-20.

76. Посібник. Машини для хімічного захисту рослин. За ред. Кравчука В.І., Войтюка Д.Г. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2010. с. 184.

77. Види обприскувачів польових [Електронний ресурс]. 2021. Режим доступу: https://agrospray.in.ua/ua/a469399-vidy-opryskivatelej-polevyh.html (дата звернення: 09.12.2025).

78. Левицький Б. Б., Бабій А. В. Аналіз конструктивних особливостей мініобприскувачів для невеликих фермерських господарств. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч. II. С. 116–125.

79. Навісні обприскувачі [Електронний ресурс]. 2022. Режим доступу: https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-tekhnika-dlya-zakhystu-roslyn/navisni-obpryskuvachi (дата звернення: 09.12.2025).

80. Причіпні штангові обприскувачі [Електронний ресурс]. 2018. Режим доступу: https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/11833-prichipni-shtangovi-obpriskuvachi.html (дата звернення: 09.12.2025)

81. Самохідний та причіпний обприскувач: який варіант обрати фермеру [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: https://alfatech.com.ua/news/samokhidnyy-ta-prychipnyy-obpryskuvach-yakyy-variant-obraty-fermeru (дата звернення: 09.12.2025).

82. HARDI International. Польові обприскувачі. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://hardi.com/ua/solutions/nozzles/field-sprayers (дата звернення: 08.12.2025).

83. AMAZONE. Технологія захисту рослин. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://amazone.net/en/products-digital-solutions/agricultural-technology/crop-protection (дата звернення: 10.12.2025).

84. BERTHOUD. Польові обприскувачі. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://berthoud.ua/row-crops-range/ (дата звернення: 10.12.2025).

85. KUHN UA. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.kuhn.ua/roslynnytstvo/obpryskuvachi (дата звернення: 08.12.2025).

86. Jacto. Штангові обприскувачі [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://jacto.com/europe/agriculturalmachines/boom-sprayers (дата звернення: 10.12.2025).

87. John Deer. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.deere.com/en/sprayers/ (дата звернення: 10.12.2025).

88. Tecnoma [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.tecnoma.com/ua/ (дата звернення: 10.12.2025).

89. Онищенко В. Б., Онищенко Б. В., Мосейчук Л.С. Аналіз конструкцій робочих органів обприскувачівпольових культур. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XX Міжнародної наукової конференції, присвяченої 119-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 17-19 жовтня, 2019 р., м. Миколаїв. МНАУ, 2019. с. 35-37.

90. ЛьвівАгроМашПроект. [Електронний ресурс]. Режим доступу: Техніка для захисту рослин https://lvivagromash.com/obpryskuvachi (дата звернення: 10.12.2025).

91. Ельворті. Обприскувачі. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://elvorti.com/catalog/obpryskuvachi/?lang=ua (дата звернення: 10.12.2025).

92. Аякс Агро. Обприскувачі причіпні. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ayax-agro.com.ua/ua/category-19-obpriskuvachi-prichepni (дата звернення: 10.12.2025).

93. АгроМОДУЛЬ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.agromodul.com.ua/ua (дата звернення: 11.12.2025).

94. Білоцерківмаз. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://bilotserkivmaz.com.ua/product/obpryskuvach-dlia-traktora-napivprychi/ (дата звернення: 11.12.2025)

95. 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. Режим доступу: https://scispace.com/pdf/nozzles-selection-and-sizing-2ol2bturwk.pdf (дата звернення: 10.12.2025).

96. Hipkins P., Grisso R., Wolf B., Reed T. Droplet Chart / Selection Guide. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute & State University, Virginia Cooperative Extension; Kansas State University. Cooperative Extension, 2009. Public. 442-031. 2 с. Режим доступу: https://bae.k-state.edu/faculty/wolf/PDF/442-031_DropletChart-SelectionGuide.pdf (дата звернення: 10.12.2025).

97. Costa A.G.F., Martin D.E., Torres U., Floyd W., Fritz B.K., Straw C.M., Bagavathiannan M.V. Nozzle type and spray volume effects on site-specific herbicide application in turfgrass using a remotely piloted aerial application system // Weed Technology. 2025. Vol. 39. Article e43. https://doi.org/10.1017/wet.2025.15.

98. Мележик О. І. Покращення дисперсності розпилення пестицидів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Мележик Олександр Іванович; Дніпропетр. держ. аграр. ун-т. Дніпро, 2009. 180 с.

99. Городецький І. М. Технологічне забезпечення точності виготовлення керамічних розпилювачів : дис. … канд. техн. наук : 05.02.08 / Городецький Іван Миколайович. Тернопіль, 2007. 198 с.

100. Кобець О.М., Лепеть Є.І. Вибір розбризкувачів для внесення КАС. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17-19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. с. 81-83.

101. TeeJet Technologies [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.teejet.com/ (дата звернення: 11.12.2025).

102. Lechler. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.lechler.com/de-en/products/agriculture/nozzles-for-fertilizer-applications (дата звернення: 11.12.2025).

103. Hypro [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.pentair.com/en-us/products/business-industry/agricultural-products/spray-nozzles.html (дата звернення: 11.12.2025).

104. Albuz [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://albuz-spray.com/en/product/agricultural-nozzles/liquid-fertilizer/liquid-fertilizer.html (дата звернення: 11.12.2025).

105. Agrotop GmbH [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.agrotop.com/ (дата звернення: 11.12.2025).

106. Sprayer Nozzle Selection. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://fieldreport.caes.uga.edu/publications/B1158/sprayer-nozzle-selection/ (дата звернення: 11.12.2025).

107. Privitera S., Manetto G., Pascuzzi S., Pessina D., Cerruto E. Drop Size Measurement Techniques for Agricultural Sprays: A State-of-the-Art Review. Agronomy. 2023. Vol. 13, Issue 3, Article 678. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13030678

108. ANSI/ASAE S572.1: Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, MI: ASABE, 2009. Режим доступу: https://cdn2.hubspot.net/hub/95784/file-32015844-pdf/docs/asabe_s572.1_droplet_size_classification.pdf

109. Yan M., Chen F., Gong C., Kang C. Characteristics of the Liquid Sheet of Air-Induction Spray. Agronomy. 2025. Vol. 15, Issue 6, Article 1270. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy15061270.

110. Mazzi G., Becce L., Ali A., Bortolini M., Gregoris E., Feltracco M., Barbaro E., Gronauer A., Gambaro A., Mazzetto F. Methodological Advancements in Testing Agricultural Nozzles and Handling of Drop Size Distribution Data. AgriEngineering. 2025. Vol. 7, Issue 5, Article 139. DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering7050139.

111. De Cauwer B., De Meuter I., De Ryck S., Dekeyser D., Zwertvaegher I., Nuyttens D. Performance of drift-reducing nozzles in controlling small weed seedlings with

contact herbicides. Agronomy. 2023. Vol. 13, No. 5, Art. 1342. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13051342.

112. Wang S., Li X., Nuyttens D., Zhang L., Liu Y., Li X. Evaluation of compact air-induction flat-fan nozzles for herbicide applications: spray drift and biological efficacy Frontiers in Plant Science. 2023. Vol. 14. Art. 1018626. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1018626.

113. TANBAYEV, K., NUKESHEV, S., ENGIN, T., & SAKTAGANOV, B. Flat Spray Nozzle for Intra-Soil Application of Liquid Mineral Fertilizers. Acta Technologica Agriculturae. Nitra: Slovak University of Agriculture in Nitra, 2023. Vol. 26, Iss. 2, May 23, 2023. P. 65–71. DOI: 10.2478/ata-2023-0009.

114. Крамарьов С. М., Бандура Л. П., Василенко О. В., Крамарьов О. С., Попов В. А. *Як вибрати розпилювач для внесення рідких мінеральних добрив*. Журнал «Агроном». 2022. Режим доступу: https://www.agronom.com.ua/yak-vybraty-rozpylyuvach-dlya-vnesennya-ridkyh-mineralnyh-dobryv/ (дата звернення: 11.12.2025)

115. *Deflection flat fan nozzles*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.spray-nozzle.co.uk/spray-nozzles/flat-fan-nozzles/deflection (дата звернення: 11.12.2025).

116. Alheidary M. H. R. *Spraying Technology and Foliar Application Result in a Smooth Layer of the Spray: A Literature Review*. Basrah Journal of Agricultural Sciences. Basrah: College of Agriculture, University of Basrah, 2023. Vol. 36, Iss. 2. P. 334-374. DOI: 10.37077/25200860.2023.36.2.25.

117. Proulx R., Peters T., Thostenson A. Spray Application Technology: Selecting Spray Nozzles with Drift-Reducing Technology. North Dakota State University Extension. Fargo, ND : NDSU Extension Service, Revised October 2024 (AE1246). Режим доступу: https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/spray-application-technology-selecting-spray-nozzles-drift-reducing (дата звернення: 12.12.2025).

118. *Y-Drop* – система внесення рідких добрив біля коренів рослин. Режим доступу: https://360yieldcenter.com.ua/site/product_view/45 (дата звернення: 12.12.2025).

119. Крамарьов С. М., Бандура Л. П., Денисенко А. В., Бабіч Д. Ю., Фролов С. В., Хижняк С. Д., Крамарьов О. С. *Еволюція удосконалення прикореневого підживлення рослин кукурудзи*. Журнал «Агроном». 13.05.2024. Режим доступу: https://www.agronom.com.ua/evolyutsiya-udoskonalennya-prykorenevogo-pidzhyvlennya-roslyn-kukurudzy/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 12.12.2025)

120. Захарченко Е. А., Адамчик Є. В. *Особливості внесення рідких азотних добрив системою Y-DROP при вирощуванні кукурудзи* / Таврійський науковий вісник. 2025. №142, ч.1. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.1.9.

121. Silva G. Applying N to tall corn: Experimenting with the Y-drop system. Michigan State University Extension. August 13, 2015. URL: https://www.canr.msu.edu/news/applying_n_to_tall_corn_experimenting_with_the_y_drop_system (дата звернення: 12.12.2025).

122. Алфьоров О. І., Пономаренко В. В. Технологічні особливості роботи форсунок для причіпних та самохідних обприскувачів. Інженерія природокористування. 2021. № 1 (19). С. 69-74. https://doi.org/10.37700/enm.2021.1(19).69-74.

123. Joshua A. McGinty, Paul A. Baumann, Wesley C. Hoffmann, and Bradley K. Fritz. 2016. “Evaluation of the Spray Droplet Size Spectra of Drift-Reducing Agricultural Spray Nozzle Designs”. *Journal of Experimental Agriculture International* 11 (3):1–5. https://doi.org/10.9734/AJEA/2016/23785.

124. Liu Q., Shan C., Zhang H., Sun K., Lan Y. Evaluation of liquid atomization and spray drift reduction of hydraulic nozzles with four spray adjuvant solutions. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, no. 2. Article 236. https://doi.org/10.3390/agriculture13020236.

125. Ferguson J. C., O’Donnell C. C., Chauhan B. S., Adkins S. W., Kruger G. R., Wang R., Urach Ferreira P. H., Hewitt A. J. Determining the uniformity and consistency of droplet size across spray drift reducing nozzles in a wind tunnel. *Crop Protection*. 2015. Vol. 76. P. 1-6. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.06.008

126. Sijs R., Kooij S., Bonn D. How surfactants influence the drop size in sprays. *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33, no. 11. Article 113608. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0066775

127. Joshua A. McGinty, Gaylon D. Morgan, Peter A. Dotray, and Paul A. Baumann. 2019. “Herbicide Formulation, Spray Nozzle Design, and Operating Pressure Affects the Droplet Size Spectra of Agricultural Sprays”. *Journal of Experimental Agriculture International* 38 (3):1–7. https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v38i330304.

128. Dahab M., Eltahir N. Spray Droplet Number and Volume Distribution as Affected by Pressure and Forward Speed. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*. 2010. Vol. 41, No. 4. Pp. 36-42. URL: https://www.researchgate.net/publication/286887299_Spray_Droplet_Number_and_Volume_Distribution_as_Affected_by_Pressure_and_Forward_Speed.

129. Mashhadi H., Ghasemi Nejad Raeini M., Asoodar M. A., Abdanan Mehdizadeh S. Effect of pressure and nozzle diameter on spray quality and droplet size in handheld gun sprayers // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26, Article 104709. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104709.

130. Nuyttens D., De Schampheleire M., Verboven P., Ramon H., Nicolaï B. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics // *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 97, no. 3. P. 333–345. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001.

131. Hewitt A. J. Droplet Size and Agricultural Spraying, Part I: spraying, spray transport, sedimentation, agglutination, and droplet size measurement techniques. *Atomization and Sprays*. 1997. Vol. 7, no. 3. P. 235–244. DOI: https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v7.i3.10.

132. Matthews G. A., Bateman R., Miller P. *Pesticide Application Methods*. 4th ed. Chichester : Wiley-Blackwell, 2014. 536 p. DOI: https://doi.org/10.1002/9781118351284.

133. 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.

134. Miller P.C.H , Butler Ellis M.C. Effects of formulation on spray nozzle performance for applications from ground-based boom sprayers. *Crop Protection*. 2000. Vol. 19, no. 8. P. 609-615. https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00080-6.

135. Khan M. et al. Spray drift reduction management in agriculture: A review. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*. 2024. Vol. 20. DOI: https://doi.org/10.1556/446.2024.00118.

136. Tudi M., Ruan H. D., Wang L., Lyu J., Sadler R., Connell D., Chu C., Phung D. T. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18, no. 3. Article 1112. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph18031112.

137. Tomantschger K., Petrović D. V., Radojević R. L., Tadić V. Mathematical method for droplet size distribution of agricultural nozzles. *Tehnički vjesnik*. 2021. Vol. 28, no. 5. P. 1749–1754. DOI: https://doi.org/10.17559/TV-20200428144856.

138. Wang J., Liang Q., Zeng T., Zhang X., Fu W., Lan Y. Drift potential characteristics of a flat fan nozzle: a numerical and experimental study. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 12. Article 6092. DOI: https://doi.org/10.3390/app12126092.

139. Zaree M., Parashkoohi M. G., Ghafori H., Zamani D. M. Investigation of flow pattern in an innovative nozzle: An experimental and numerical study in agricultural systems // *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2024. Vol. 23. P. 212-218. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.11.004.

140. Kumar S. M., Hogan C. J., Fredericks S. A., Hong J. Visualization and Characterization of Agricultural Sprays Using Machine Learning based Digital Inline Holography. 2023. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.00792.

141. Li C., He R., He Z., Kumar S. S., Fredericks S. A., Hogan C. J., Hong J. Spatially-Resolved Characterization of Oil-in-Water Emulsion Sprays. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.00171.

142. Vhora K., Janiga G., Lorenz H., Seidel-Morgenstern A., Gutierrez M. F., Schulze P. Comparative Study of Droplet Diameter Distribution: Insights from Experimental Imaging and Computational Fluid Dynamics Simulations. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 5. Article 1824. DOI: https://doi.org/10.3390/app14051824.

143. Santosh, Shirwal S., Sushilendra, Raghavendra V., Mareppa H., Vinutha K. Assessment of Nozzle Spray Characteristics for Agriculture Spraying // *International*

Journal of Environment and Climate Change. 2023. Vol. 13. No. 12. P. 527-536. DOI: https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i123710.

144. Вожик Ю. Г., Швидя В. О., Панасюк В. І., Вітрух П. І., Корнюшин В. М. Дослідження структури повітряного потоку від гвинта мультикоптерного обприскувача. Механіка та автоматика агропромислового виробництва. 2023. Вип. 2 (116). С.213-219.

145. Вожик Ю. Г., Швидя В. О., Панасюк В. І., Корнюшин В. М. Експериментальні дослідження впливу повітряних потоків від гвинтів мультикоптерного обприскувача на якість обприскування в умовах дії вітру. Механіка та автоматика агропромислового виробництва. 2023. Вип. 3 (117). С. 47-54.

146. Qin Weicai, Chen Panyang. Analysis of the research progress on the deposition and drift of spray droplets by plant protection UAVs. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 14935. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-40556-0.

147. Castro-Tanzi S., Winchell M., Tang Z., Teske M. E., Whitehouse G. R., Fritz B., Martin D. Validation of the spray drift modeling software AGDISPpro applied to remotely piloted aerial application systems. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 966. Article 178725. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178725.

148. Chen, S., Lan, Y., Zhou, Z., Ouyang, F., Wang, G., Huang, X., Deng, X., Cheng, S. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 2, Article 195. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10020195.

149. Fritz B. K., Hoffmann C., Bagley W. E. Effects of Spray Mixtures on Droplet Size under Aerial Application Conditions and Implications on Drift / Applied Engineering in Agriculture. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 1-9. doi: https://doi.org/10.13031/2013.29467.

150. Ribeiro L. F. O., Vitória E. L. Impact of Application Rate and Spray Nozzle on Droplet Distribution on Watermelon Crops Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, № 8. Article 1351. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14081351.

151. Lou, Z., Xin, F., Han, X., Lan, Y., Duan, T., Fu, W. Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider

mites *Agronomy*. 2018. Vol. 8, № 9, Article 187. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy8090187.

152. Pan X., Yang S., Gao Y., Wang Z., Zhai C., Qiu W. Evaluation of Spray Drift from an Electric Boom Sprayer: Impact of Boom Height and Nozzle Type. Agronomy. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 160. doi: https://doi.org/10.3390/agronomy15010160.

153. Nowakowski T., Chlebowski J., Kamiński J. R. Changes of coefficient of variation of transverse liquid distribution for single and dual stream atomizers // Engineering for Rural Development : proceedings of the 16th International Scientific Conference (Jelgava, Latvia, 24-26 May 2017). Jelgava : Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2017. P. 1434-1439. DOI: https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N324.

154. Parafiniuk S., Nowakowski T., Koszel M., Chlebowski J., Findura P. Influence of chosen working parameters of sprayer on coefficient of variation of transverse liquid distribution for twin fan nozzle. Acta Technologica Agriculturae. 2024. Vol. 27, № 3. P. 173-178. DOI: https://doi.org/10.2478/ata-2024-0023.

155. Бабій А. В. Аналіз параметрів штангового обприскувача з метою збільшення його продуктивності. Техніка та енергетика. 2019. Т. 10, № 4. С. 51–55. doi: https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.156.

156. Онищенко Б.В., Онищенко В.Б. Основи розробки розпилювального пристрою обприскувача з ступеневим регулюванням дисперсності розпилення: монографія. Київ: Вид. НУБіП України, 2016. 248 с.

157. Онищенко В. Любченко І. Результати дослідження дефлекторних розпилюючих пристроїв. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2016. Вип. 20. С. 203-207.

158. Бабій А.В. Дослідження впливу висоти встановлення штанги на рівномірність обприскування за шириною захвату. *Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України*: зб. тез доповідей міжн. наук.-практ. онлайн конф., присвяченої 20-й річниці з дня створення факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України, 23-24 вересня 2021 року. С. 118-120.

159. 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.

160. A. Babii, B. Levytskyi, T. Dovbush, M. Babii, N. Khomuk, A. Dovbush, V. Valiashek. Mathematical model of sprayer tank loading. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 609–616.

161. Шульгін А., Самулєєв В., Чемерис Є., Трегуб О. Адаптація моделі відцентрової форсунки для розрахунково-експериментального дослідження робочого процесу в основній камері згоряння ТРДДФ. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2022. № 18(25). DOI: https://doi.org/10.54858/dndia.2022-18-18.

162. Заєць М. Л. Оцінювання ефективності застосування обприскувача з регулятором норми внесення за змінної робочої швидкості // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки: електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: Видавничий дім «Гельветика», 2025. Вип. 15, т. 1. С. 40-52. DOI: https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-4.

163. Babii A. Study of the efficiency of working mixture application in chemical crop protection. Visnyk TNTU. Tern.: TNTU, 2020. Vol 98. No 2. P. 99-109. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02.099.

164. Ponomarenko V., Liulka D., Vasyliv V., Yakobchuk R., Babko Y., Slyva Y. Research and application of nozzles with inclined inlet channels for jet sulphitators in the sugar industry. *Animal Science and Food Technology*. 2024. Vol. 15. No. 4. P. 80-101. DOI: https://doi.org/10.31548/animal.4.2024.80.

165. Кобець О.М., Лепеть Є.І. Оцінка впливу висоти штанги на якість поперечного розподілу КАС струменевими розбризкувачами. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. с. 219-221.

166. Кобець О. М., Лепеть Є. І. Дефлекторний розпилювач. Патент на корисну модель № 164203 UA, МПК A01M 7/00, u 2025 04632; заявл. 22.09.2025. Опубл. 09.09.2026. Бюл. № 36/2026.

167. Фотополімерна смола Anycubic ABS-Like Resin Pro White. URL: https://ua.anycubic.biz/white-abs-like-resin-pro-anycubic-1kg.

168. ДСТУ ISO 5682-2:2019. Устаткування для захисту рослин. Обприскувальне устаткування. Частина 2. Методи випробовування гідравлічних обприскувачів [Чинний від 2019-01-11]. Вид. офіц. Київ. 2019. 11 с.

169. ДСТУ EN ISO 4788:2022 Лабораторний посуд. Градуйовані мірні циліндри (EN ISO 4788:2005, IDT; ISO 4788:2005, IDT). [Чинний від 2023-31-12]. Вид. офіц. Київ. 2022. 12 с.

170. ДСТУ EN 837-1:2004. Манометри. Частина 1. Манометри з трубкою Бурдона. Розміри, метрологічні характеристики, вимоги та випробування [Чинний від 2005-01-07]. Вид. офіц. Київ. 2004. 27 с.

171. ДСТУ ISO 5682-3:2019 Устаткування для захисту рослин. Обприскувальне устаткування. Частина 3. Метод випробування систем регулювання витрат робочої рідини сільсько-господарських гідравлічних обприскувачів (ISO 5682-3:2017, IDT) [Чинний від 2019-01-11]. Вид. офіц. Київ. 2019.

172. ДСТУ ISO 22866:2019. Обладнання для захисту рослин. Методи визначення зносу краплин в експлуатаційних умовах (ISO 22866:2005, IDT). [Чинний від 2019-01-09]. Вид. офіц. Київ. 2019.

173. 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. DOI: 10.1016/j.cropro.2023.106492.

174. Мельниченко О. П., Якименко І. Л., Розумнюк В. Т. Статистична обробка експериментальних даних : навч. посіб. Біла Церква : БДАУ, 2006. 156 с.

175. Волокита А. М., Селіванов В. Л. Основи теорії планування експерименту : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 41 с.

176. Кисельов О. В., Комарова І. Б., Мілько Д. О., Бакарджиєв Р. О.. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): навч. посіб.; за заг. ред. Д. О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 1181 с.

177. Дубовой В. М., Квєтний Р. Н., Михальов О. І., Усов А. В. Моделювання та оптимізація систем : підручник. Вінниця : ПП «ТДЕ-Дельвейс», 2017. 804 с. ISBN 978-617-7237-23-4.

178. Царенко О. М., Злобін Ю. А., Скляр В. Г., Панченко С. М. Комп'ютерні методи в сільському господарстві та біології : навч. посіб. Суми : Університетська книга, 2000. 203 с.

179. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.

180. Лисенко О. І., Тачиніна О. М., Алєксєєва І. В. Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій: підручник. Київ : НАУ, 2017. 212 с.

181. Wolfram S. *An Elementary Introduction to the Wolfram Language* (3rd ed.). [електронний ресурс]. Wolfram Research. Доступно за адресою: https://www.wolfram.com/language/elementary-introduction/3rd-ed/

182. Шолохов С. М., Самборський І. І., Головін Ю. О. Теоретичні основи планування експерименту та обробки експериментальних даних : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 159 с.

183. Kobets O., Lepet Ye. Results of experimental studies of jet nozzles for the application of liquid mineral fertilizers. *Engineering, Energy, Transport AIC.* 2025. Vol. 4, No. 131. P. 32–38 DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-4. DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-4.

184. 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. Вип. 13(44), с. 212-218. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).212-218.

185. Кобець, О. М., Лепеть, Є. І. Результати порівняльних досліджень пристрою для внесення РМД. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2026. Вип. 56. с. 69-77. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.69-77.

186. Лепеть Є. І. Результати експериментальних досліджень розбризкувачів для внесення рідких мінеральних добрив. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2025. с. 51-53.

187. Кобець О. М., Лепеть Є. І. Класифікація та принципи роботи обприскувачів та розбрискувачів. The 12th International scientific and practical conference «European congress of scientific discovery» (November 10-12, 2025) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2025. p. 17-20.

188. Лепеть Є. І. Обґрунтування конструкції комбінованого розбризкувача для внесення КАС. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2024. с.56-58.

189. ДСТУ 4397:2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 16 с.

190. Данильченко М. Г., Гладич Б. Б., Гевко Р. Б., Ткаченко І. Г. Експертно-аналітична оцінка технологічних і економічних показників сільськогосподарської техніки. Тернопіль : Економічна думка, 2001. 60 с.

191. Завгородній О. І., Левкін Д. А., Котко Я. М., Левкін А. В. Економіко-математичне моделювання прогнозування ймовірних ризиків технологічних процесів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32 (71), ч. 4. С. 66–70. DOI: https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/10.

192. Gemini [Електронний ресурс] : штучний інтелект / розробник Google. 2026. Режим доступу: https://gemini.google.com (дата звернення: 30.09.2026).

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Основні характеристики щілинних розпилювачів

Розпилювач	Витрата рідини при тиску МПа, л/хв			Розмір краплин, мкм	Кут факелу розпилу	Матеріал виготовлення	Робочий тиск, МПа
	0,2	0,25	0,3				
TeeJet							
XR11008	2,58	2,88	3,16	341-403	80, 110	Нержавіюча сталь, полімер, кераміка, латунь	0,1-0,4
XR11010	3,23	3,61	3,95				
XR11015	4,83	5,4	5,92	404-502			
Lechler							
ST 110-08	2,58	2,88	3,16	341-403	80, 110	Полімер(ПОМ), кераміка, латунь	0,2-0,5
Hypro							
HF-140-08	2,61	2,92	3,2	>665	140	Полімер	0,15-0,6
HF-140-10	3,3	3,7	4,0				
HF-140-20	6,6	7,3	8,0				
HF-140-30	9,8	11,0	12,0				
HF-140-40	13,1	14,6	16,0				
HF-140-50	16,3	18,3	20,0				
HF-140-60	19,6	21,9	24,0				

Таблиця А.2 – Основні характеристики інжекторних розпилювачів

Розпилювач	Витрата рідини при тиску МПа, л/хв			Розмір краплин, мкм	Кут факелу розпилу	Матеріал виготовлення	Робочий тиск, МПа
	0,2	0,3	0,4				
TeeJet							
AI8003 (AI80015-AI11008)	0,96	1,18	1,36	404-502 503-665	80, 110	Нержавіюча сталь	0,2-0,8; РМД (0,2-0,4)
AIC11005 (AIC110015-AIC11015)	1,61	1,97	2,27		110	Нержавіюча сталь, полімер	
TT11003 (TT110015-TT11006)	0,96	1,18	1,36	503-665		Полімер	0,1-0,7; РМД (0,2-0,4)
Nanodrift 03 (Minidrift 015 Nanodrift-05)	0,98	1,20	1,39				

Таблиця А.2 – Основні характеристики інжекторних розпилювачів (продовження)

Розпилювач	Витрата рідини при тиску МПа, л/хв			Розмір краплин, мкм	Кут факелу розпилу	Матеріал виготовлення	Робочий тиск, МПа
	0,2	0,3	0,4				
Lechler							
ID120-03 (ID120-01-ID120-10)	0,97	1,19	1,37	404-502 503-665	90, 120	Полімер, кераміка	0,2-0,8; РМД (0,2-0,4)
IDK120-03 (IDK120-01-IDK120-10)							0,1-0,6; РМД (0,15-0,3)
Hardi							
Nanodrift 03 (Nanodrift 02 Nanodrift-10)	0,99	1,21	1,40	404-502	110	Полімер	0,1-0,6; РМД (0,15-0,3)
Nanodrift 03 (Minidrift 015 Nanodrift-05)	0,98	1,20	1,39				

Таблиця А.3 – Основні характеристики дефлекторних розпилювачів

Розпилювач	Витрата рідини при тиску МПа, л/хв			Розмір краплин, мкм	Кут факелу розпилу	Матеріал виготовлення	Робочий тиск, МПа
	0,15	0,2	0,3				
TeeJet							
TF-4 (TF-2–TF-10)	2,23	2,57	3,15	500-700	105-145	Нержавіюча сталь, полімер	0,1-0,3
4TTJ06 (4TTJ02- 4TTJ15)	1,39	1,94	2,37				0,15-0,5
Lechler							
FD06 (FD02-FD20)	1,7	1,96	2,40	600-700	130	Полімер	0,15-0,4
PRE 130-05	1,55	1,73	2,0				
Львівагромаш							
РД-1,6	1,94	2,23	2,6	500-700	115-140	Кераміка	0,15-0,4
РД-2,0	2,20	2,56	3,15				
РД-4,0	10,0	11,6	13,51				

Таблиця А.4 – Основні характеристики струменевих розпилювачів

Розпилювач	Витрата рідини при тиску МПа, л/хв			Розмір краплин, мкм	Матеріал виготовлення	Робочий тиск, МПа
	0,1	0,2	0,3			
TeeJet						
SJ7-04VP (SJ7-015VP SJ7-15VP)	-	1,68	1,95	600-900	Полімер	0,15-0,4
Lechler						
FL1,5 (FL0,8-FL1,8)	0,98	1,38	1,69	600-900	Нержавіюча сталь, полімер	0,1-0,3
АгроМОДУЛЬ						
RD.0,5.SD-5-b	0,99	1,40	1,71	600-900	Нержавіюча сталь	0,1-0,3

Додаток Б



УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 164203

ДЕФЛЕКТОРНИЙ РОЗПИЛЮВАЧ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей **09.09.2026.**

Директор
Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»

О.П. Орлюк

УКРНОІВІ

УКРАЇНА (19) UA (11) 164203 (13) U
(51) МПК (2026.01)
A01M 7/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2025 04632
(22) Дата подання заявки: 22.09.2025
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 10.09.2026
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 09.09.2026, Бюл.№ 36

(72) Винахідник(и):
Кобець Олександр Миколайович (UA),
Лепеть Євген Іванович (UA)
(73) Володілець (володільці):
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49009 (UA)

(54) ДЕФЛЕКТОРНИЙ РОЗПИЛЮВАЧ

(57) Реферат:

Дефлекторний розпилювач містить корпус з вихідним каналом для рідини і встановлений поперек каналу дефлектор. Канал має напівциліндричну форму, криволінійна форма якого містить виступ параболічного перерізу, що збільшується до виходу каналу. Виступ розташований симетрично відносно площини поверхні каналу. Поверхня дефлектора виконана у вигляді зрізаної частини подовженої циклоїди. Зверху робочої частини корпусу встановлено ковпачок з отворами, що збігаються з відповідними отворами на корпусі дефлектора, при цьому вони розташовані з однієї сторони ковпачка.

UA 164203 U

Корисна модель належить до сільськогосподарського машинобудування, переважно до машин, що використовуються для розпилу рідких робочих сумішей.

Аналогом корисної моделі є дефлекторний розпилювач (патент № 1050623 A01M 7/00 30.10.1983), що містить корпус з вихідним каналом для рідини і встановлений поперек каналу дефлектор. Канал має напівциліндричну форму, криволінійна форма якого містить виступ параболічного перерізу, що збільшується до виходу каналу. Виступ розташований симетрично відносно площини поверхні каналу.

Недоліком даного розпилювача є забивання отворів при роботі з добривами і висококонцентрованими пестицидами, в результаті знижується надійність і якість роботи.

Найближчим аналогом корисної моделі є розпилювач (патент № 75347 A01M 7/00 26.11.2012), що містить корпус з вихідним каналом для рідини і встановлений поперек каналу дефлектор, канал має напівциліндричну форму, криволінійна форма якого містить виступ параболічного перерізу, що збільшується до виходу каналу, виступ розташований симетрично відносно площини поверхні каналу, поверхня дефлектора виконана у вигляді зрізаної частини подовженої циклоїди.

Недоліком даного розпилювача є нерівномірне розподілення рідини по ширині факела розпилу, що призводить до нерівномірності внесення, зниження ефективності розпилювача і втрат препарату.

В основу корисної моделі поставлена задача спрощення конструкції і підвищення рівномірності розподілення рідини по ширині факела розпилу, адаптація внесення під різні погодні умови.

Поставлена задача вирішується тим, що у дефлекторному розпилювачі, що містить корпус з вихідним каналом для рідини і встановлений поперек каналу дефлектор, канал має напівциліндричну форму, криволінійна форма якого містить виступ параболічного перерізу, що збільшується до виходу каналу, виступ розташований симетрично відносно площини поверхні каналу, поверхня дефлектора виконана у вигляді зрізаної частини подовженої циклоїди, згідно з корисною моделлю, зверху робочої частини корпусу встановлено ковпачок з отворами, що збігаються з відповідними отворами на корпусі дефлектора, при цьому вони розташовані з однієї сторони ковпачка.

Корисна модель пояснюється графічними зображеннями, де на фіг. 1 зображено дефлекторний розпилювач, на фіг. 2 - вигляд А на фіг. 1, на фіг. 3 - ковпачок.

Розпилювач складається з корпусу 1 (фіг. 1), де з однієї сторони розташований отвір 2 для роботи розпилювача, як дефлекторного, а з іншої отвори 3 для роботи, як струменевого. Для переключення між різними типами розприскувачів зверху робочої частини корпусу 1 встановлено ковпачок (фіг. 2), який має аналогічні отвори 2 і 3, проте вони розташовані з однієї сторони ковпачка.

Дефлекторний розпилювач працює наступним чином.

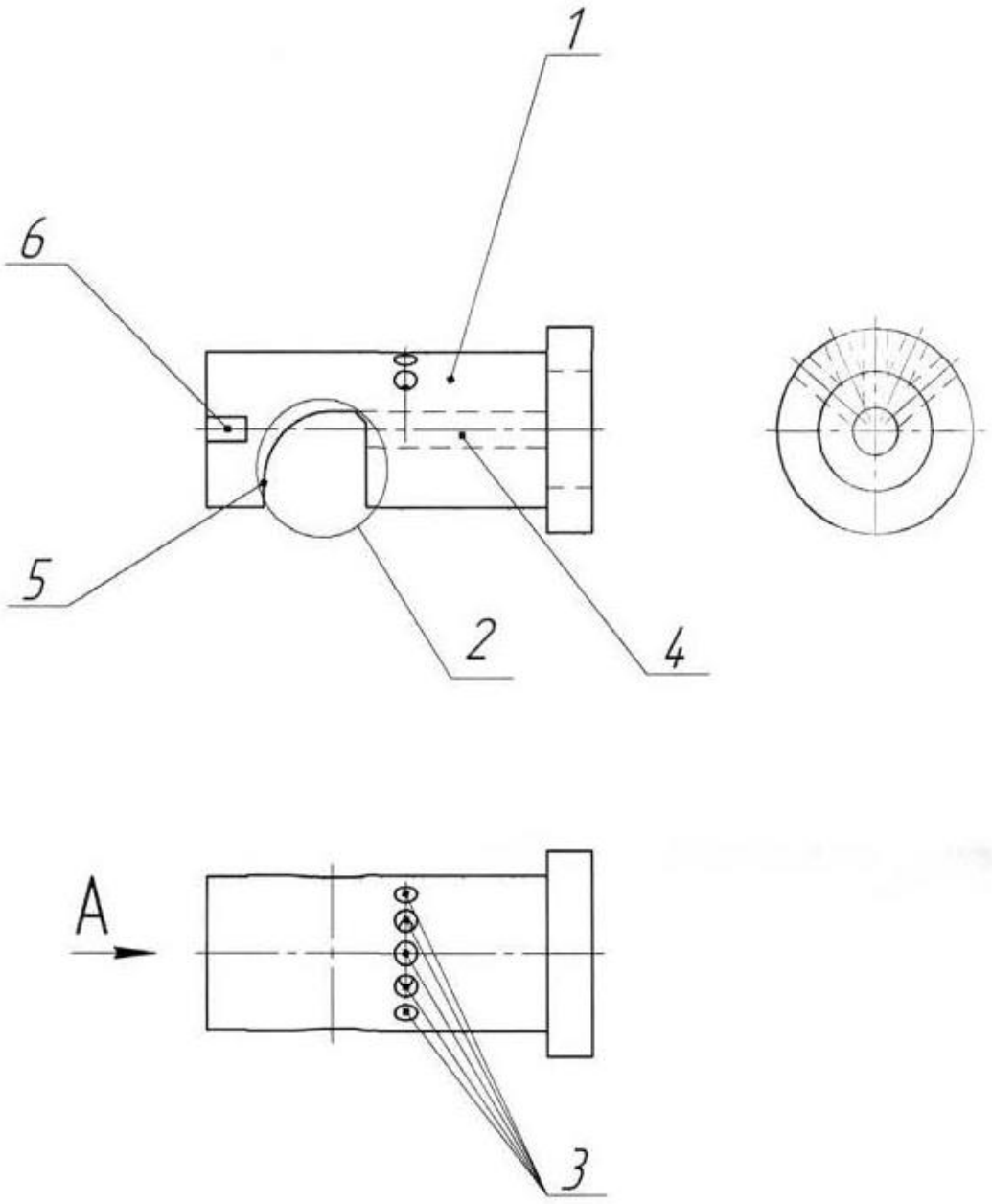
Робоча рідина потрапляє в канал 4 корпусу 1 і направляється до отвору 2, вдаряючись об виступ 5, рівномірно розпилюється на дрібні частинки по контуру отвору 2 без перенасичення рідиною центральної частини факела розпилу. Поверхня отвору 2 виконана криволінійною, що сприяє рівномірному формуванню факела розпилу, виключаючи вихроутворення. У результаті покращується надійність і якість роботи, підвищується рівномірність розподілення рідини по ширині факела розпилу.

Для переключення між різними типами розприскувачів зверху робочої частини корпусу 1 встановлено ковпачок, який має аналогічні отвори 2 і 3, проте вони розташовані з однієї сторони ковпачка. Для роботи розпилювача, як дефлекторного - отвір 2, а з іншої отвори 3 для роботи, як струменевого.

Для правильного суміщення корпусу і ковпачка є відповідні пази 6 та 7. Для фіксації ковпачка відносно корпуса в необхідному положенні використовується гвинт 8.

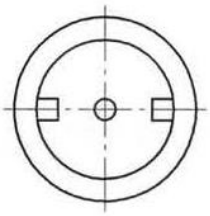
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Дефлекторний розпилювач, що містить корпус з вихідним каналом для рідини і встановлений поперек каналу дефлектор, канал має напівциліндричну форму, криволінійна форма якого містить виступ параболічного перерізу, що збільшується до виходу каналу, виступ розташований симетрично відносно площини поверхні каналу, поверхня дефлектора виконана у вигляді зрізаної частини подовженої циклоїди, який **відрізняється** тим, що зверху робочої частини корпусу встановлено ковпачок з отворами, що збігаються з відповідними отворами на корпусі дефлектора, при цьому вони розташовані з однієї сторони ковпачка.

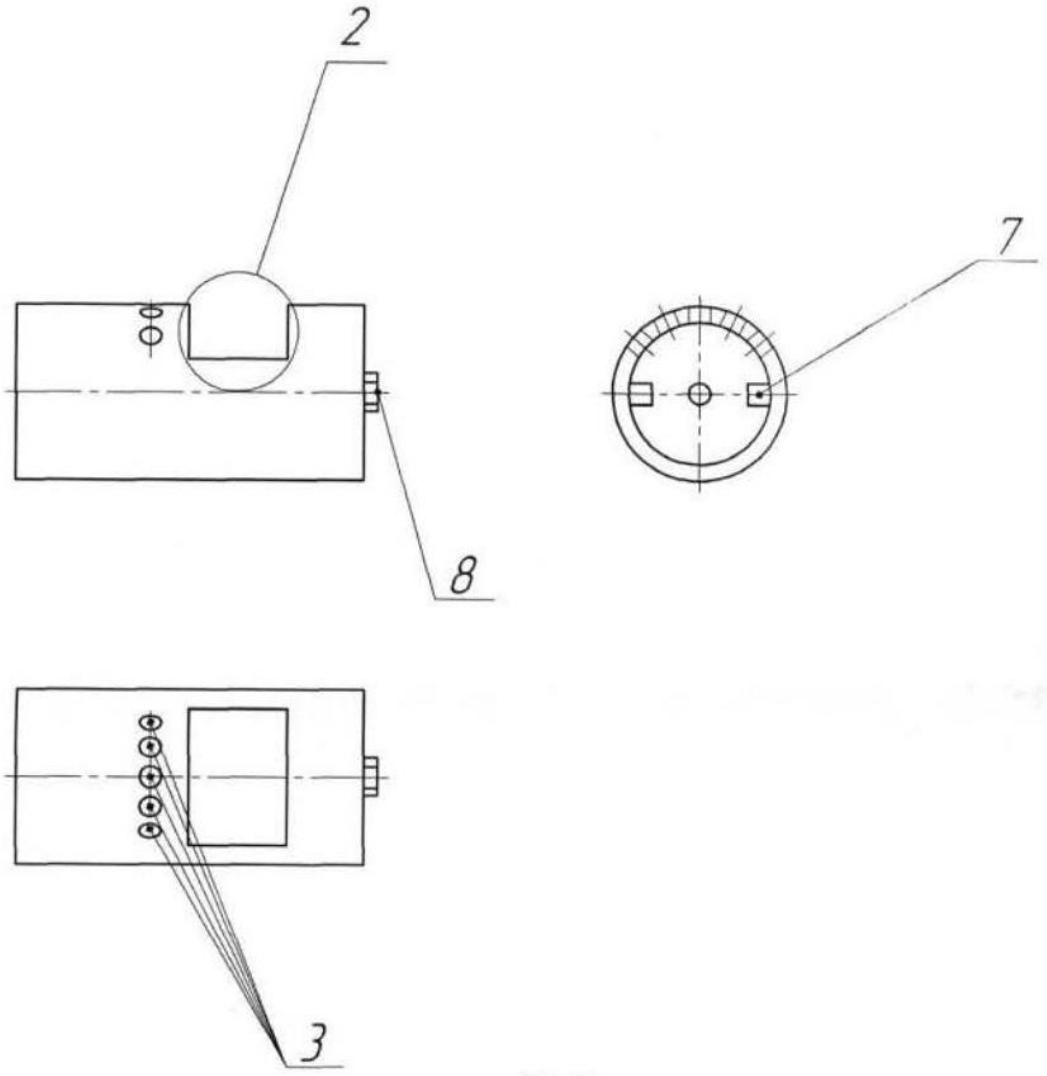


Фіг. 1

Вигляд А



Фіг. 2



Фіг. 3

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

ДО "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій", вул. Дмитра Годзенка, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток В

Результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі

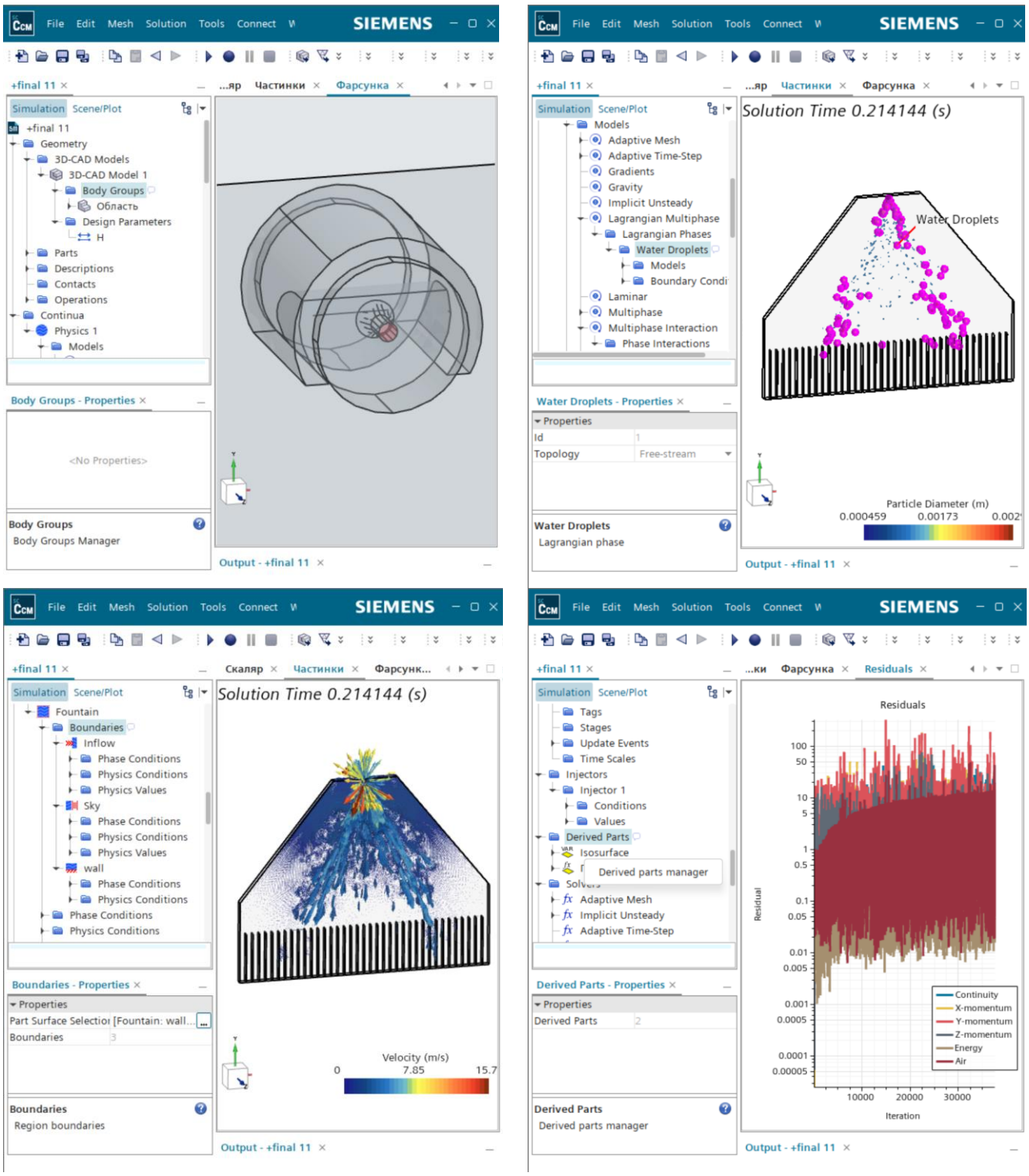


Рисунок В.1 – Скріншоти процесу моделювання в програмному пакеті Star-CCM+

Таблиця В.1 – Зведені результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі (1 група факторів)

№	x_4	x_5	x_6	φ, °	δ, мм	N	β, °	ψ, %
1	–1	–1	–1	20	1	3	55,2	39,4
2	–1	–1	0	20	1	5	78,1	42,6
3	–1	–1	1	20	1	7	96,6	49,0
4	–1	0	–1	20	2	3	59,1	26,7
5	–1	0	0	20	2	5	82,8	25,4
6	–1	0	1	20	2	7	100,1	31,8
7	–1	1	–1	20	3	3	62,4	35,3
8	–1	1	0	20	3	5	85,5	36,8
9	–1	1	1	20	3	7	103,7	43,1
10	0	–1	–1	25	1	3	64,2	35,2
11	0	–1	0	25	1	5	90,5	37,5
12	0	–1	1	25	1	7	113,3	44,7
13	0	0	–1	25	2	3	69,8	20,6
14	0	0	0	25	2	5	97,1	18,7
15	0	0	1	25	2	7	120,4	24,9
16	0	1	–1	25	3	3	73,5	27,4
17	0	1	0	25	3	5	101,2	29,1
18	0	1	1	25	3	7	124,6	35,8
19	1	–1	–1	30	1	3	73,5	40,3
20	1	–1	0	30	1	5	102,2	42,5
21	1	–1	1	30	1	7	127,7	49,7
22	1	0	–1	30	2	3	78,3	24,4
23	1	0	0	30	2	5	107,2	23,1
24	1	0	1	30	2	7	132,1	29,7
25	1	1	–1	30	3	3	82,1	31,3
26	1	1	0	30	3	5	112,5	33,0
27	1	1	1	30	3	7	137,7	39,6

Таблиця В.2 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud обробки результатів чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі (1 група факторів)

```
Mβ = {{-1, -1, -1, 55.2}, {-1, -1, 0, 78.1}, {-1, -1, 1, 96.6}, {-1, 0, -1, 59.1},
   {-1, 0, 0, 82.8}, {-1, 0, 1, 100.1}, {-1, 1, -1, 62.4}, {-1, 1, 0, 85.5}, {-1, 1, 1, 103.7},
   {0, -1, -1, 64.2}, {0, -1, 0, 90.5}, {0, -1, 1, 113.3}, {0, 0, -1, 69.8}, {0, 0, 0, 97.1},
   {0, 0, 1, 120.4}, {0, 1, -1, 73.5}, {0, 1, 0, 101.2}, {0, 1, 1, 124.6}, {1, -1, -1, 73.5},
   {1, -1, 0, 102.2}, {1, -1, 1, 127.7}, {1, 0, -1, 78.3}, {1, 0, 0, 107.2}, {1, 0, 1, 132.1},
   {1, 1, -1, 82.1}, {1, 1, 0, 112.5}, {1, 1, 1, 137.7}};
nlmβ = NonlinearModelFit[Mβ, a00 + a40 * x4 + a50 * x5 + a60 * x6 +
       нелінійна регресія
    a45 * x4 * x5 + a46 * x4 * x6 + a56 * x5 * x6 +
    a44 * x4^2 + a55 * x5^2 + a66 * x6^2, {a00, a40, a50, a60, a45, a46, a56, a44, a55, a66},
   {x4, x5, x6}];
nlmβ["ParameterTable"]
nlmβ["ANOVATable"]
nlmβ["RSquared"]
Normal[nlmβ]
нормальний вираз
Mψ = {{-1, -1, -1, 39.4}, {-1, -1, 0, 42.6}, {-1, -1, 1, 49}, {-1, 0, -1, 26.7},
   {-1, 0, 0, 25.4}, {-1, 0, 1, 31.8}, {-1, 1, -1, 35.3}, {-1, 1, 0, 36.8}, {-1, 1, 1, 43.1},
   {0, -1, -1, 35.2}, {0, -1, 0, 37.5}, {0, -1, 1, 44.7}, {0, 0, -1, 20.6}, {0, 0, 0, 18.7},
   {0, 0, 1, 24.9}, {0, 1, -1, 27.4}, {0, 1, 0, 29.1}, {0, 1, 1, 35.8}, {1, -1, -1, 40.3},
   {1, -1, 0, 42.5}, {1, -1, 1, 49.7}, {1, 0, -1, 24.4}, {1, 0, 0, 23.1}, {1, 0, 1, 29.7},
   {1, 1, -1, 31.3}, {1, 1, 0, 33}, {1, 1, 1, 39.6}};
nlmψ = NonlinearModelFit[Mψ, a00 + a40 * x4 + a50 * x5 + a60 * x6 +
       нелінійна регресія
    a45 * x4 * x5 + a46 * x4 * x6 + a56 * x5 * x6 +
    a44 * x4^2 + a55 * x5^2 + a66 * x6^2, {a00, a40, a50, a60, a45, a46, a56, a44, a55, a66},
   {x4, x5, x6}];
nlmψ["ParameterTable"]
nlmψ["ANOVATable"]
nlmψ["RSquared"]
Normal[nlmψ]
нормальний вираз
x40 = 25;
dx4 = 5;
x50 = 2;
dx5 = 1;
x60 = 5;
dx6 = 2;
yyβ[φ_, δ_, NN_] := yβ[(φ - x40) / dx4, (δ - x50) / dx5, (NN - x60) / dx6];
Expand[yyβ[φ, δ, NN]]
розкрити дужки
Optminβ =
 FindMinimum[{yyβ[φ, δ, NN], x40 - dx4 ≤ φ ≤ x40 + dx4, x50 - dx5 ≤ δ ≤ x50 + dx5,
 знайти мінімум
   x60 - dx6 ≤ NN ≤ x60 + dx6}, {φ, x40 - 0 dx4}, {δ, x50 - 0 dx5}, {NN, x60 - 0 dx6}]
Optmaxβ = FindMaximum[{yyβ[φ, δ, NN], x40 - dx4 ≤ φ ≤ x40 + dx4, x50 - dx5 ≤ δ ≤ x50 + dx5,
          знайти максимум
```

```
    x60 - dx6 ≤ NN ≤ x60 + dx6}, {φ, x40 - 0 dx4}, {δ, x50 - 0 dx5}, {NN, x60 - 0 dx6}]
φOptmaxβ = φ /. Last[Optmaxβ];
                останній
δOptmaxβ = δ /. Last[Optmaxβ];
                останній
NNOptmaxβ = NN /. Last[Optmaxβ];
                останній
Plot3D[{yyβ[φ, δ, x60]}, {φ, x40 - dx4, x40 + dx4}, {δ, x50 - dx5, x50 + dx5},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"φ, °", " δ, мм  ", "β, ° "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Magenta]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  малиновий
Plot3D[{yyβ[φ, x50, NN]}, {φ, x40 - dx4, x40 + dx4}, {NN, x60 - dx6, x60 + dx6},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"φ, °", "N  ", "β, ° "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Magenta]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  малиновий
yyψ[φ_, δ_, NN_] := yψ[(φ - x40) / dx4, (δ - x50) / dx5, (NN - x60) / dx6];
Expand[yyψ[φ, δ, NN]]
розкрити дужки
Optminψ =
 FindMinimum[{yyψ[φ, δ, NN], x40 - dx4 ≤ φ ≤ x40 + dx4, x50 - dx5 ≤ δ ≤ x50 + dx5,
 знайти мінімум
    x60 - dx6 ≤ NN ≤ x60 + dx6}, {φ, x40 - 0 dx4}, {δ, x50 - 0 dx5}, {NN, x60 - 0 dx6}]
Optmaxψ = FindMaximum[{yyψ[φ, δ, NN], x40 - dx4 ≤ φ ≤ x40 + dx4, x50 - dx5 ≤ δ ≤ x50 + dx5,
          знайти максимум
    x60 - dx6 ≤ NN ≤ x60 + dx6}, {φ, x40 - 0 dx4}, {δ, x50 - 0 dx5}, {NN, x60 - 0 dx6}]
φOptmaxψ = φ /. Last[Optmaxψ];
                останній
δOptmaxψ = δ /. Last[Optmaxψ];
                останній
NNOptmaxψ = NN /. Last[Optmaxψ];
                останній
Plot3D[{yyψ[φ, δ, x60]}, {φ, x40 - dx4, x40 + dx4}, {δ, x50 - dx5, x50 + dx5},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"φ, °", " δ, мм  ", "ψ, % "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Green]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  зелений
Plot3D[{yyψ[φ, x50, NN]}, {φ, x40 - dx4, x40 + dx4}, {NN, x60 - dx6, x60 + dx6},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"φ, °", "N  ", "ψ, % "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Green]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  зелений
FindMinimum[{yyψ[φ, δ, NN] / yyβ[φ, δ, NN], x40 - dx4 ≤ φ ≤ x40 + dx4, x50 - dx5 ≤ δ ≤ x50 + dx5,
знайти мінімум
  x60 - dx6 ≤ NN ≤ x60 + dx6}, {φ, x40 - 0 dx4}, {δ, x50 - 0 dx5}, {NN, x60 - 0 dx6}]
```

Таблиця В.3 – Зведені результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі (2 група факторів)

№	x_1	x_2	x_3	p, МПа	h, м	d, мм	ψ, %
1	–1	–1	–1	0,2	0,5	1,0	30,0
2	–1	–1	0	0,2	0,5	1,5	33,5
3	–1	–1	1	0,2	0,5	2,0	39,2
4	–1	0	–1	0,2	0,7	1,0	26,8
5	–1	0	0	0,2	0,7	1,5	27,1
6	–1	0	1	0,2	0,7	2,0	34,5
7	–1	1	–1	0,2	0,9	1,0	21,4
8	–1	1	0	0,2	0,9	1,5	19,2
9	–1	1	1	0,2	0,9	2,0	25,1
10	0	–1	–1	0,25	0,5	1,0	29,7
11	0	–1	0	0,25	0,5	1,5	30,8
12	0	–1	1	0,25	0,5	2,0	40,0
13	0	0	–1	0,25	0,7	1,0	23,4
14	0	0	0	0,25	0,7	1,5	26,5
15	0	0	1	0,25	0,7	2,0	31,4
16	0	1	–1	0,25	0,9	1,0	17,4
17	0	1	0	0,25	0,9	1,5	17,0
18	0	1	1	0,25	0,9	2,0	23,5
19	1	–1	–1	0,3	0,5	1,0	31,8
20	1	–1	0	0,3	0,5	1,5	31,7
21	1	–1	1	0,3	0,5	2,0	38,7
22	1	0	–1	0,3	0,7	1,0	25,2
23	1	0	0	0,3	0,7	1,5	25,9
24	1	0	1	0,3	0,7	2,0	32,9
25	1	1	–1	0,3	0,9	1,0	17,1
26	1	1	0	0,3	0,9	1,5	17,3
27	1	1	1	0,3	0,9	2,0	24,0

Таблиця В.4 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud обробки результатів чисельного моделювання комбінованого розпилювача в струменевому режимі (2 група факторів)

```
Mψ = {{-1, -1, -1, 30}, {-1, -1, 0, 33.5}, {-1, -1, 1, 39.2}, {-1, 0, -1, 26.8},
    {-1, 0, 0, 27.1}, {-1, 0, 1, 34.5}, {-1, 1, -1, 21.4}, {-1, 1, 0, 19.2}, {-1, 1, 1, 25.1},
    {0, -1, -1, 29.7}, {0, -1, 0, 30.8}, {0, -1, 1, 40}, {0, 0, -1, 23.4}, {0, 0, 0, 26.5},
    {0, 0, 1, 31.4}, {0, 1, -1, 17.4}, {0, 1, 0, 17}, {0, 1, 1, 23.5}, {1, -1, -1, 31.8},
    {1, -1, 0, 31.7}, {1, -1, 1, 38.7}, {1, 0, -1, 25.2}, {1, 0, 0, 25.9}, {1, 0, 1, 32.9},
    {1, 1, -1, 17.1}, {1, 1, 0, 17.3}, {1, 1, 1, 24}};
nlmψ = NonlinearModelFit[Mψ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 +
        нелінійна регресія
     a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 + a23 * x2 * x3 +
     a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2, {a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 },
    {x1, x2, x3}];
nlmψ["ParameterTable"]
nlmψ["ANOVATable"]
nlmψ["RSquared"]
Normal[nlmψ]
нормальний вираз
x10 = 0.25;
dx1 = 0.05;
x20 = 0.7;
dx2 = 0.2;
x30 = 1.5;
dx3 = 0.2;
yyψ[p_, h_, d_] := yψ[(p - x10) / dx1, (h - x20) / dx2, (d - x30) / dx3];
Expand[yyψ[p, h, d]]
розкрити дужки
Optminψ =
 FindMinimum[{yyψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3},
 знайти мінімум
  {p, x10 - 0 dx1}, {h, x20 - 0 dx2}, {d, x30 - 0 dx3}]
Optmaxψ = FindMaximum[{yyψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
          знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - 0 dx1}, {h, x20 - 0 dx2}, {d, x30 - 0 dx3}]
pOptmaxψ = p /. Last[Optmaxψ];
                останній
hOptmaxψ = h /. Last[Optmaxψ];
                останній
dOptmaxψ = d /. Last[Optmaxψ];
                останній
yyψexp[p_, h_, d_] := 56.77192166666637` - 14.650004166666603` d + 8.91666666666664` d^2 +
   42.791668750000134` h - 6.75000833333332` d h - 33.02085416666675` h^2 - 191.33367499999815` p -
   5.9999666666666` d p - 59.9998333333334` h p + 401.66699999999605` p^2;
Plot3D[{yyψ[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"p, кПа", " h, м", "ψ, % "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки   директива   розмір шрифту   сімейство шрифту   легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Green}]
 сітка   стиль графіка   зелений
```

```
Plot3D[{yyψ[p, x20, d]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
 графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"p, кПа", "d, мм ", "ψ, % "},
  позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Green}]
   сітка  стиль графіка  зелений
Plot3D[{yyψ[p, h, x30], yyψexp[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
 графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"p, кПа", " h, м", "ψ, % "},
   позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
   стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
   Mesh → 30, PlotStyle → {{Opacity[0.6], Lighter[Green]}, {Opacity[0.6], Lighter[Blue]}}]
    сітка  стиль графіка  прозорість  світліший  зелений  прозорість  світліший  синій
Plot3D[{yyψ[p, x20, d], yyψexp[p, x20, d]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
 графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"p, кПа", "d, мм ", "ψ, % "},
   позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
   стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
   Mesh → 30, PlotStyle → {{Opacity[0.6], Lighter[Green]}, {Opacity[0.6], Lighter[Blue]}}]
    сітка  стиль графіка  прозорість  світліший  зелений  прозорість  світліший  синій
```

Додаток Г

Результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі

Таблиця Г.1 – Зведені результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі (1 група факторів)

№	x_7	x_8	x_9	l, мм	r, мм	t, мм	β, °	ψ, %
1	–1	–1	–1	1,5	1,5	0,20	67,7	61,4
2	–1	–1	0	1,5	1,5	0,35	81,5	44,6
3	–1	–1	1	1,5	1,5	0,50	87,1	37,6
4	–1	0	–1	1,5	4,0	0,20	86,8	52,1
5	–1	0	0	1,5	4,0	0,35	100,6	35,3
6	–1	0	1	1,5	4,0	0,50	106,2	28,3
7	–1	1	–1	1,5	6,5	0,20	88,4	49,7
8	–1	1	0	1,5	6,5	0,35	102,2	32,9
9	–1	1	1	1,5	6,5	0,50	107,8	25,9
10	0	–1	–1	2,5	1,5	0,20	83,8	52,7
11	0	–1	0	2,5	1,5	0,35	97,5	35,9
12	0	–1	1	2,5	1,5	0,50	103,2	29
13	0	0	–1	2,5	4,0	0,20	104,1	43,9
14	0	0	0	2,5	4,0	0,35	117,9	27,1
15	0	0	1	2,5	4,0	0,50	123,5	20,2
16	0	1	–1	2,5	6,5	0,20	107	42
17	0	1	0	2,5	6,5	0,35	120,7	25,2
18	0	1	1	2,5	6,5	0,50	126,4	18,3
19	1	–1	–1	3,5	1,5	0,20	85,8	50,1
20	1	–1	0	3,5	1,5	0,35	99,6	33,2
21	1	–1	1	3,5	1,5	0,50	105,2	26,3
22	1	0	–1	3,5	4,0	0,20	107,4	41,8
23	1	0	0	3,5	4,0	0,35	121,2	25
24	1	0	1	3,5	4,0	0,50	126,8	18
25	1	1	–1	3,5	6,5	0,20	111,5	40,4
26	1	1	0	3,5	6,5	0,35	125,3	23,5
27	1	1	1	3,5	6,5	0,50	130,9	16,6

Таблиця Г.2 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud обробки результатів чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі (1 група факторів)

```
Mβ = {{-1, -1, -1, 67.7}, {-1, -1, 0, 81.5}, {-1, -1, 1, 87.1}, {-1, 0, -1, 86.8},
    {-1, 0, 0, 100.6}, {-1, 0, 1, 106.2}, {-1, 1, -1, 88.4}, {-1, 1, 0, 102.2},
    {-1, 1, 1, 107.8}, {0, -1, -1, 83.8}, {0, -1, 0, 97.5}, {0, -1, 1, 103.2}, {0, 0, -1, 104.1},
    {0, 0, 0, 117.9}, {0, 0, 1, 123.5}, {0, 1, -1, 107}, {0, 1, 0, 120.7}, {0, 1, 1, 126.4},
    {1, -1, -1, 85.8}, {1, -1, 0, 99.6}, {1, -1, 1, 105.2}, {1, 0, -1, 107.4}, {1, 0, 0, 121.2},
    {1, 0, 1, 126.8}, {1, 1, -1, 111.5}, {1, 1, 0, 125.3}, {1, 1, 1, 130.9}};
nlmβ = NonlinearModelFit[Mβ, a00 + a70 * x7 + a80 * x8 + a90 * x9 +
        нелінійна регресія
     a78 * x7 * x8 + a79 * x7 * x9 + a89 * x8 * x9 +
     a77 * x7^2 + a88 * x8^2 + a99 * x9^2, {a00, a70, a80, a90, a78, a79, a89, a77, a88, a99 },
    {x7, x8, x9}];
nlmβ["ParameterTable"]
nlmβ["ANOVATable"]
nlmβ["RSquared"]
Normal[nlmβ]
нормальний вираз
Mψ = {{-1, -1, -1, 61.4}, {-1, -1, 0, 44.6}, {-1, -1, 1, 37.6}, {-1, 0, -1, 52.1},
    {-1, 0, 0, 35.3}, {-1, 0, 1, 28.3}, {-1, 1, -1, 49.7}, {-1, 1, 0, 32.9}, {-1, 1, 1, 25.9},
    {0, -1, -1, 52.7}, {0, -1, 0, 35.9}, {0, -1, 1, 29}, {0, 0, -1, 43.9}, {0, 0, 0, 27.1},
    {0, 0, 1, 20.2}, {0, 1, -1, 42}, {0, 1, 0, 25.2}, {0, 1, 1, 18.3}, {1, -1, -1, 50.1},
    {1, -1, 0, 33.2}, {1, -1, 1, 26.3}, {1, 0, -1, 41.8}, {1, 0, 0, 25}, {1, 0, 1, 18},
    {1, 1, -1, 40.4}, {1, 1, 0, 23.5}, {1, 1, 1, 16.6}};
nlmψ = NonlinearModelFit[Mψ, a00 + a70 * x7 + a80 * x8 + a90 * x9 +
        нелінійна регресія
     a78 * x7 * x8 + a79 * x7 * x9 + a89 * x8 * x9 +
     a77 * x7^2 + a88 * x8^2 + a99 * x9^2, {a00, a70, a80, a90, a78, a79, a89, a77, a88, a99 },
    {x7, x8, x9}];
nlmψ["ParameterTable"]
nlmψ["ANOVATable"]
nlmψ["RSquared"]
Normal[nlmψ]
нормальний вираз
x70 = 2.5;
dx7 = 1;
x80 = 4;
dx8 = 2.5;
x90 = 0.35;
dx9 = 0.15;
yyβ[l_, r_, t_] := yβ[(l - x70) / dx7, (r - x80) / dx8, (t - x90) / dx9];
Expand[yyβ[l, r, t]]
розкрити дужки
Optminβ =
 FindMinimum[{yyβ[l, r, t], x70 - dx7 ≤ l ≤ x70 + dx7, x80 - dx8 ≤ r ≤ x80 + dx8, x90 - dx9 ≤ t ≤ x90 + dx9},
  знайти мінімум
  {l, x70 - 0 dx7}, {r, x80 - 0 dx8}, {t, x90 - 0 dx9}]
Optmaxβ = FindMaximum[{yyβ[l, r, t], x70 - dx7 ≤ l ≤ x70 + dx7, x80 - dx8 ≤ r ≤ x80 + dx8,
          знайти максимум
   x90 - dx9 ≤ t ≤ x90 + dx9}, {l, x70 - 0 dx7}, {r, x80 - 0 dx8}, {t, x90 - 0 dx9}]
```

```
lOptmaxβ = l /. Last[Optmaxβ];
                останній
rOptmaxβ = r /. Last[Optmaxβ];
                останній
tOptmaxβ = t /. Last[Optmaxβ];
                останній
Plot3D[{yyβ[l, r, x90]}, {l, x70 - dx7, x70 + dx7}, {r, x80 - dx8, x80 + dx8},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"l, мм", " r, мм  ", "β, ° "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Magenta]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  малиновий
Plot3D[{yyβ[l, x80, t]}, {l, x70 - dx7, x70 + dx7}, {t, x90 - dx9, x90 + dx9},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"l, мм", "t,, мм", "β, ° "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Magenta]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  малиновий
yyψ[l_, r_, t_] := yψ[(l - x70) / dx7, (r - x80) / dx8, (t - x90) / dx9];
Expand[yyψ[l, r, t]]
розкрити дужки
Optminψ =
 FindMinimum[{yyψ[l, r, t], x70 - dx7 ≤ l ≤ x70 + dx7, x80 - dx8 ≤ r ≤ x80 + dx8, x90 - dx9 ≤ t ≤ x90 + dx9},
 знайти мінімум
  {l, x70 - 0 dx7}, {r, x80 - 0 dx8}, {t, x90 - 0 dx9}]
Optmaxψ = FindMaximum[{yyψ[l, r, t], x70 - dx7 ≤ l ≤ x70 + dx7, x80 - dx8 ≤ r ≤ x80 + dx8,
          знайти максимум
   x90 - dx9 ≤ t ≤ x90 + dx9}, {l, x70 - 0 dx7}, {r, x80 - 0 dx8}, {t, x90 - 0 dx9}]
lOptmaxψ = l /. Last[Optmaxψ];
                останній
rOptmaxψ = r /. Last[Optmaxψ];
                останній
tOptmaxψ = t /. Last[Optmaxψ];
                останній
Plot3D[{yyψ[l, r, x90]}, {l, x70 - dx7, x70 + dx7}, {r, x80 - dx8, x80 + dx8},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"l, мм", " r, мм  ", "ψ, % "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Green]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  зелений
Plot3D[{yyψ[l, x80, t]}, {l, x70 - dx7, x70 + dx7}, {t, x90 - dx9, x90 + dx9},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"l, мм", "t,, мм", "ψ, % "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Lighter[Green]}]
 сітка  стиль графіка  світліший  зелений
FindMinimum[{yyψ[l, r, t] / yyβ[l, r, t], x70 - dx7 ≤ l ≤ x70 + dx7, x80 - dx8 ≤ r ≤ x80 + dx8,
знайти мінімум
  x90 - dx9 ≤ t ≤ x90 + dx9}, {l, x70 - 0 dx7}, {r, x80 - 0 dx8}, {t, x90 - 0 dx9}]
```

Таблиця В.2 – Зведені результати чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі (2 група факторів)

№	x_1	x_2	x_3	p, МПа	h, м	d, мм	ψ, %
1	–1	–1	–1	0,20	0,5	1,0	17,8
2	–1	–1	0	0,20	0,5	1,5	16,8
3	–1	–1	1	0,20	0,5	2,0	15,8
4	–1	0	–1	0,20	0,7	1,0	13,8
5	–1	0	0	0,20	0,7	1,5	13,2
6	–1	0	1	0,20	0,7	2,0	12,7
7	–1	1	–1	0,20	0,9	1,0	10,7
8	–1	1	0	0,20	0,9	1,5	10,6
9	–1	1	1	0,20	0,9	2,0	10,4
10	0	–1	–1	0,25	0,5	1,0	15,0
11	0	–1	0	0,25	0,5	1,5	14,8
12	0	–1	1	0,25	0,5	2,0	14,6
13	0	0	–1	0,25	0,7	1,0	12,3
14	0	0	0	0,25	0,7	1,5	12,5
15	0	0	1	0,25	0,7	2,0	12,7
16	0	1	–1	0,25	0,9	1,0	10,4
17	0	1	0	0,25	0,9	1,5	11,0
18	0	1	1	0,25	0,9	2,0	11,7
19	1	–1	–1	0,30	0,5	1,0	11,6
20	1	–1	0	0,30	0,5	1,5	12,2
21	1	–1	1	0,30	0,5	2,0	12,8
22	1	0	–1	0,30	0,7	1,0	10,1
23	1	0	0	0,30	0,7	1,5	11,1
24	1	0	1	0,30	0,7	2,0	12,1
25	1	1	–1	0,30	0,9	1,0	9,5
26	1	1	0	0,30	0,9	1,5	10,9
27	1	1	1	0,30	0,9	2,0	12,3

Таблиця Г.2 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud обробки результатів чисельного моделювання комбінованого розпилювача в дефлекторному режимі (2 група факторів)

```
Mψ = {{-1, -1, -1, 17.8}, {-1, -1, 0, 16.8}, {-1, -1, 1, 15.8}, {-1, 0, -1, 13.8},
   {-1, 0, 0, 13.2}, {-1, 0, 1, 12.7}, {-1, 1, -1, 10.7}, {-1, 1, 0, 10.6}, {-1, 1, 1, 10.4},
   {0, -1, -1, 15}, {0, -1, 0, 14.8}, {0, -1, 1, 14.6}, {0, 0, -1, 12.3}, {0, 0, 0, 12.5},
   {0, 0, 1, 12.7}, {0, 1, -1, 10.4}, {0, 1, 0, 11}, {0, 1, 1, 11.7}, {1, -1, -1, 11.6},
   {1, -1, 0, 12.2}, {1, -1, 1, 12.8}, {1, 0, -1, 10.1}, {1, 0, 0, 11.1}, {1, 0, 1, 12.1},
   {1, 1, -1, 9.5}, {1, 1, 0, 10.9}, {1, 1, 1, 12.3}};
nlmψ = NonlinearModelFit[Mψ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 +
       нелінійна регресія
    a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 + a23 * x2 * x3 +
    a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2, {a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 },
   {x1, x2, x3}];
nlmψ["ParameterTable"]
nlmψ["ANOVATable"]
nlmψ["RSquared"]
Normal[nlmψ]
нормальний вираз
x10 = 0.25;
dx1 = 0.05;
x20 = 0.7;
dx2 = 0.2;
x30 = 1.5;
dx3 = 0.2;
yyψ[p_, h_, d_] := yψ[(p - x10) / dx1, (h - x20) / dx2, (d - x30) / dx3];
Expand[yyψ[p, h, d]]
розкрити дужки
Optminψ =
 FindMinimum[{yyψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3},
 знайти мінімум
  {p, x10 - 0 dx1}, {h, x20 - 0 dx2}, {d, x30 - 0 dx3}]
Optmaxψ = FindMaximum[{yyψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
          знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - 0 dx1}, {h, x20 - 0 dx2}, {d, x30 - 0 dx3}]
pOptmaxψ = p /. Last[Optmaxψ];
                останній
hOptmaxψ = h /. Last[Optmaxψ];
                останній
dOptmaxψ = d /. Last[Optmaxψ];
                останній
yyψexp[p_, h_, d_] := 19.97812499999999` + 0.449999999999998` d - 22.874999999999986` h +
   10.9375` h^2 + 46.50000000000004` p - 7.500000000000006` h p - 125.` p^2;


Plot3D[{yyψ[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"p, кПа", " h, м", "ψ, % "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
```

```
  Mesh → 30, PlotStyle → {Green}]
  сітка  стиль графіка  зелений
Plot3D[{yyψ[p, x20, d]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2–х змінних
  AxesLabel → {"p, кПа", "d, мм  ", "ψ, % "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Green}]
  сітка  стиль графіка  зелений
Plot3D[{yyψ[p, h, x30], yyψexp[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2–х змінних
  AxesLabel → {"p, кПа", " h, м", "ψ, % "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {{Opacity[0.6], Lighter[Green]}, {Opacity[0.6], Lighter[Blue]}}]
  сітка  стиль графіка  прозорість  світліший  зелений  прозорість  світліший  синій
Plot3D[{yyψ[p, x20, d], yyψexp[p, x20, d]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2–х змінних
  AxesLabel → {"p, кПа", "d, мм  ", "ψ, % "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {{Opacity[0.6], Lighter[Green]}, {Opacity[0.6], Lighter[Blue]}}]
  сітка  стиль графіка  прозорість  світліший  зелений  прозорість  світліший  синій
```

Додаток Д

Результати експериментальних досліджень серійних та розробленого розпилювачів

Таблиця Д.1 – Зведені результати експериментальних досліджень серійних та розробленого розпилювачів в дефлекторному режимі

№	x_1	x_2	x_3	РД-4,0				Комбінований дефлекторний			
				1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	1	1	0	10,4	10,8	10,6	10,6	9,4	9,8	9,6	9,6
2	1	–1	0	13,5	14,0	13,9	13,8	13,3	13,9	13,6	13,6
3	–1	1	0	12,4	12,8	12,6	12,6	11,6	12,0	11,8	11,8
4	–1	–1	0	15,6	16,0	15,8	15,8	15,3	15,7	15,5	15,5
5	0	0	0	12,3	12,7	12,5	12,5	12,2	12,6	12,4	12,4
6	1	0	1	12,0	12,4	12,3	12,2	11,2	11,6	11,4	11,4
7	1	0	–1	11,2	11,6	11,4	11,4	10,6	11,0	10,8	10,8
8	–1	0	1	14,1	14,7	14,4	14,4	13,4	13,8	13,6	13,6
9	–1	0	–1	13,4	13,8	13,6	13,6	12,8	13,2	13,0	13,0
10	0	0	0	12,6	12,9	12,8	12,8	12,4	12,8	12,6	12,6
11	0	1	1	11,4	11,8	11,6	11,6	11,0	11,4	11,2	11,2
12	0	1	–1	11,8	12,1	12,0	12,0	10,8	11,2	11,0	11,0
13	0	–1	1	15,0	15,4	15,2	15,2	14,8	15,2	15,0	15,0
14	0	–1	–1	14,2	14,5	14,4	14,4	14,4	14,8	14,6	14,6
15	0	0	0	12,5	12,9	12,7	12,7	12,3	12,7	12,5	12,5

Таблиця Д.2 – Зведені результати експериментальних досліджень серійних та розробленого розпилювачів в струменевому режимі

№	x_1	x_2	x_3	RD,05,SD5-b				Комбінований струменевий			
				1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	1	1	0	18,6	19,2	18,5	18,77	16,4	16,6	16,5	16,5
2	1	–1	0	28,7	27,8	28,6	28,4	31,4	31,2	31,2	31,3
3	–1	1	0	23	23,4	23,8	23,4	21,2	21,5	21,4	21,4
4	–1	–1	0	31,4	32,1	31,8	31,8	33,9	33,6	34,0	33,8
5	0	0	0	27	27,5	27,3	27,3	26,2	25,9	25,9	26,0
6	1	0	1	30,3	31	31,1	30,8	29,7	29,8	29,9	29,8
7	1	0	–1	23,5	24,2	24,3	24,0	24,2	24,1	24,3	24,2
8	–1	0	1	34,7	35,5	35,3	35,2	34,6	34,7	34,7	34,7
9	–1	0	–1	27	27,4	27,2	27,2	28,5	28,6	28,4	28,5
10	0	0	0	26,8	27,2	27	27,0	26,4	26,4	26,2	26,3
11	0	1	1	26,6	27	26,8	26,8	24,7	24,6	24,5	24,6
12	0	1	–1	21,6	22,3	22	22,0	20,1	20,1	20,1	20,1
13	0	–1	1	33,2	34	33,6	33,6	35,2	35,1	35,3	35,2
14	0	–1	–1	25,8	26,4	25,9	26,0	28,0	27,9	28,1	28,0
15	0	0	0	27	27,8	27,4	27,4	25,8	26,1	25,8	25,9

Таблиця Д.3 – Результати стастичної обробки рівнянь регресії досліджень серійних та розробленого розпилювачів в дефлекторному режимі

РД-4,0									
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
12,656	–1,046	–1,550	0,263	0,000	0,008	–0,300	0,085	0,460	0,168
S_{b0}^2	S_{b1}^2	S_{b2}^2	S_{b3}^2	S_{b12}^2	S_{b13}^2	S_{b23}^2	S_{b11}^2	S_{b22}^2	S_{b33}^2
0,0064	0,0024	0,0024	0,0024	0,0048	0,0048	0,0048	0,0052	0,0052	0,0052
Δb_0	Δb_1	Δb_2	Δb_3	Δb_{12}	Δb_{13}	Δb_{23}	Δb_{11}	Δb_{22}	Δb_{33}
0,1145	0,0701	0,0701	0,0701	0,0992	0,0992	0,0992	0,1032	0,1032	0,1032
1	1	1	1	0	0	1	0	1	1
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
12,656	–1,046	–1,550	0,263	0	0	–0,300	0	0,460	0,168
Комбінований дефлекторний									
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
12,5	–1,0625	-1,8875	0,225	–0,075	$-1{,}332\cdot10^{-15}$	–0,05	–0,3125	0,4375	0,0125
S_{b0}^2	S_{b1}^2	S_{b2}^2	S_{b3}^2	S_{b12}^2	S_{b13}^2	S_{b23}^2	S_{b11}^2	S_{b22}^2	S_{b33}^2
0,0033	0,0013	0,0013	0,0013	0,0025	0,0025	0,0025	0,0027	0,0027	0,0027
Δb_0	Δb_1	Δb_2	Δb_3	Δb_{12}	Δb_{13}	Δb_{23}	Δb_{11}	Δb_{22}	Δb_{33}
0,0825	0,0505	0,0505	0,0505	0,0715	0,0715	0,0715	0,0744	0,0744	0,0744
1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
12,5	–1,0625	–1,8875	0,225	–0,075	0	0	–0,3125	0,4375	0

– значущі коефіцієнти

Таблиця Д.4 – Результати стастичної обробки рівнянь регресії досліджень серійних та розробленого розпилювачів в дефлекторному режимі

RD,05,SD5-b									
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
27,2	–1,95	–3,6042	3,3958	–0,3083	–0,2917	–0,6833	0,2722	–1,9194	1,7972
S_{b0}^2	S_{b1}^2	S_{b2}^2	S_{b3}^2	S_{b12}^2	S_{b13}^2	S_{b23}^2	S_{b11}^2	S_{b22}^2	S_{b33}^2
0,0138	0,0052	0,0052	0,0052	0,0104	0,0104	0,0104	0,0112	0,0112	0,0112
Δb_0	Δb_1	Δb_2	Δb_3	Δb_{12}	Δb_{13}	Δb_{23}	Δb_{11}	Δb_{22}	Δb_{33}
0,1680	0,1029	0,1029	0,1029	0,1455	0,1455	0,1455	0,1515	0,1515	0,1515
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
27,2	–1,95	–3,6042	3,3958	–0,3083	–0,2917	–0,6833	0,2722	–1,9194	1,7972
Комбінований струменевий									
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
26,0667	–2,0750	–5,7125	2,9375	–0,6000	–0,1500	–0,6750	1,0042	–1,3208	2,2292
S_{b0}^2	S_{b1}^2	S_{b2}^2	S_{b3}^2	S_{b12}^2	S_{b13}^2	S_{b23}^2	S_{b11}^2	S_{b22}^2	S_{b33}^2
0,0144	0,0054	0,0054	0,0054	0,0108	0,0108	0,0108	0,0117	0,0117	0,0117
Δb_0	Δb_1	Δb_2	Δb_3	Δb_{12}	Δb_{13}	Δb_{23}	Δb_{11}	Δb_{22}	Δb_{33}
0,1718	0,1052	0,1052	0,1052	0,1487	0,1487	0,1487	0,1548	0,1548	0,1548
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
26,0667	–2,0750	–5,7125	2,9375	–0,6000	–0,1500	–0,6750	1,0042	–1,3208	2,2292

– значущі коефіцієнти

Таблиця Д.5 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud для визначення оптимальних значень факторів з метою мінімізації коефіцієнта варіації ψ розпилювача РД-4,0

```
Mψ = {{1, 1, 0, 10.6}, {1, -1, 0, 13.8}, {-1, 1, 0, 12.6}, {-1, -1, 0, 15.8}, {0, 0, 0, 12.5},
   {1, 0, 1, 12.2333333333333}, {1, 0, -1, 11.4}, {-1, 0, 1, 14.4}, {-1, 0, -1, 13.6},
   {0, 0, 0, 12.7666666666667}, {0, 1, 1, 11.6}, {0, 1, -1, 11.9666666666667},
   {0, -1, 1, 15.2}, {0, -1, -1, 14.3666666666667}, {0, 0, 0, 12.7}};
x10 = 0.25;
dx1 = 0.05;
x20 = 0.7;
dx2 = 0.2;
x30 = 1.5;
dx3 = 0.5;
y1ψ[x1_, x2_, x3_] = 12.6555555555556 + -1.04583333333333 x1 + -1.55 x2 + 0.2625 x3 +
   8.88178419700125 E - 16 x1 x2 + 0.00833333333333464 x1 x3 + -0.299999999999999 x2 x3 +
                        експонента
   0.0847222222222248 x1 x1 + 0.459722222222225 x2 x2 + 0.168055555555561 x3 x3;
y2ψ[x1_, x2_, x3_] = 12.6555555555556 + -1.04583333333333 x1 + -1.55 x2 + 0.2625 x3 +
   0 x1 x2 + 0 x1 x3 + -0.299999999999999 x2 x3 + 0 x1 x1 + 0.459722222222225 x2 x2 +
   0.168055555555561 x3 x3;
y3ψ[x1_, x2_, x3_] = y2ψ[(x1 - 0.25) / 0.05, (x2 - 0.7) / 0.2, (x3 - 1.5) / 0.5];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0ψ[x1_, x2_, x3_] = Fit[Mψ, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0ψ[x1, x2, x3]
y1ψ[x1, x2, x3]
y2ψ[x1, x2, x3]
Simplify[y3ψ[p, h, d]]
спростити
Optψ = FindMinimum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти мінімум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]
Optψ = FindMaximum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]
Plot3D[{y3ψ[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"p, МПа  ", "h, м  ", "ψ, %  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
 сітка  стиль графіка  жовтий
Plot3D[{y3ψ[x10, h, d]}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"h, м  ", "d, мм  ", "ψ, %  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
 сітка  стиль графіка  жовтий
```

Таблиця Д.6 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud для визначення оптимальних значень факторів з метою мінімізації коефіцієнта варіації ψ комбінованого дефлекторного розпилювача

```
Mψ = {{1, 1, 0, 9.6}, {1, -1, 0, 13.6}, {-1, 1, 0, 11.8}, {-1, -1, 0, 15.5}, {0, 0, 0, 12.4},
   {1, 0, 1, 11.4}, {1, 0, -1, 10.8}, {-1, 0, 1, 13.6}, {-1, 0, -1, 13}, {0, 0, 0, 12.6},
   {0, 1, 1, 11.2}, {0, 1, -1, 11}, {0, -1, 1, 15}, {0, -1, -1, 14.6}, {0, 0, 0, 12.5}};
x10 = 0.25;
dx1 = 0.05;
x20 = 0.7;
dx2 = 0.2;
x30 = 1.5;
dx3 = 0.5;
y1ψ[x1_, x2_, x3_] = 12.5 + -1.0625 x1 + -1.8875 x2 + 0.224999999999999 x3 +
   -0.0750000000000006 x1 x2 + -1.33226762955019 E - 15 x1 x3 + -0.0500000000000003 x2 x3 +
                                                    експонента
   -0.3125 x1 x1 + 0.4375 x2 x2 + 0.0124999999999957 x3 x3;
y2ψ[x1_, x2_, x3_] = 12.5 + -1.0625 x1 + -1.8875 x2 + 0.224999999999999 x3 +
   -0.0750000000000006 x1 x2 + 0 x1 x3 + 0 x2 x3 + -0.3125 x1 x1 + 0.4375 x2 x2 + 0 x3 x3;
y3ψ[x1_, x2_, x3_] = y2ψ[(x1 - 0.25) / 0.05, (x2 - 0.7) / 0.2, (x3 - 1.5) / 0.5];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0ψ[x1_, x2_, x3_] = Fit[Mψ, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0ψ[x1, x2, x3]
y1ψ[x1, x2, x3]
y2ψ[x1, x2, x3]
Expand[y3ψ[p, h, d]]
розкрити дужки
Expand[y3ψ[O9, P9, Q9]]
розкрити дужки
Expand[y3ψ[0.2, 0.5, 1]]
розкрити дужки
Optψ = FindMinimum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти мінімум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]
Optψ = FindMaximum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]
Plot3D[{y3ψ[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"p, МПа  ", "h, м  ", "ψ, %  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
 сітка  стиль графіка  жовтий
Plot3D[{y3ψ[x10, h, d]}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"h, м  ", "d, мм  ", "ψ, %  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
 сітка  стиль графіка  жовтий
```

Таблиця Д.7 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud для визначення оптимальних значень факторів з метою мінімізації коефіцієнта варіації ψ розпилювача RD.05.SD5-b

```
Mψ = {{1, 1, 0, 18.7666666666667}, {1, -1, 0, 28.3666666666667}, {-1, 1, 0, 23.4},
   {-1, -1, 0, 31.7666666666667}, {0, 0, 0, 27.2666666666667}, {1, 0, 1, 30.8},
   {1, 0, -1, 24}, {-1, 0, 1, 35.1666666666667}, {-1, 0, -1, 27.2}, {0, 0, 0, 27},
   {0, 1, 1, 26.8}, {0, 1, -1, 21.9666666666667}, {0, -1, 1, 33.6}, {0, -1, -1, 26.0333333333333},
   {0, 0, 0, 27.4}};
x10 = 0.25;
dx1 = 0.05;
x20 = 0.7;
dx2 = 0.2;
x30 = 1.5;
dx3 = 0.5;
y1ψ[x1_, x2_, x3_] = 27.2222222222222 + -1.95 x1 + -3.60416666666667 x2 + 3.39583333333333 x3 +
   -0.308333333333334 x1 x2 + -0.291666666666666 x1 x3 + -0.683333333333334 x2 x3 +
   0.272222222222217 x1 x1 + -1.91944444444445 x2 x2 + 1.79722222222222 x3 x3;
y2ψ[x1_, x2_, x3_] = 27.2222222222222 + -1.95 x1 + -3.60416666666667 x2 + 3.39583333333333 x3 +
   -0.308333333333334 x1 x2 + -0.291666666666666 x1 x3 + -0.683333333333334 x2 x3 +
   0.272222222222217 x1 x1 + -1.91944444444445 x2 x2 + 1.79722222222222 x3 x3;
y3ψ[x1_, x2_, x3_] = y2ψ[(x1 - 0.25) / 0.05, (x2 - 0.7) / 0.2, (x3 - 1.5) / 0.5];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0ψ[x1_, x2_, x3_] = Fit[Mψ, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0ψ[x1, x2, x3]
y1ψ[x1, x2, x3]
y2ψ[x1, x2, x3]
Simplify[y3ψ[p, h, d]]
спростити
Optψ = FindMinimum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти мінімум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]
Optψ = FindMaximum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]


Plot3D[{y3ψ[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"p, MPa  ", "h, m  ", "ψ, %  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {LightBrown}]
 сітка  стиль графіка  світло-коричневий
Plot3D[{y3ψ[x10, h, d]}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"h, m  ", "d, mm  ", "ψ, %  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {LightBrown}]
 сітка  стиль графіка  світло-коричневий
```

Таблиця Д.8 – Програмна реалізація в середовищі Wolfram Cloud для визначення оптимальних значень факторів з метою мінімізації коефіцієнта варіації ψ комбінованого струменевого розпилювача

```
Mψ = {{1, 1, 0, 16.5000033333333}, {1, -1, 0, 31.2999966666667}, {-1, 1, 0, 21.4},
   {-1, -1, 0, 33.8}, {0, 0, 0, 26}, {1, 0, 1, 29.8}, {1, 0, -1, 24.2}, {-1, 0, 1, 34.7},
   {-1, 0, -1, 28.5000033333333}, {0, 0, 0, 26.3}, {0, 1, 1, 24.5999966666667},
   {0, 1, -1, 20.1}, {0, -1, 1, 35.2}, {0, -1, -1, 28}, {0, 0, 0, 25.9}};
x10 = 0.25;
dx1 = 0.05;
x20 = 0.7;
dx2 = 0.2;
x30 = 1.5;
dx3 = 0.5;
y1ψ[x1_, x2_, x3_] = 26.0666666666667 + -2.07500041666667 x1 + -5.71249958333333 x2 +
   2.93749916666667 x3 + -0.599998333333334 x1 x2 + -0.149999166666665 x1 x3 +
   -0.675000833333332 x2 x3 + 1.00416749999999 x1 x1 + -1.32083416666667 x2 x2 +
   2.22916666666666 x3 x3;
y2ψ[x1_, x2_, x3_] = 26.0666666666667 + -2.07500041666667 x1 + -5.71249958333333 x2 +
   2.93749916666667 x3 + -0.599998333333334 x1 x2 + -0.149999166666665 x1 x3 +
   -0.675000833333332 x2 x3 + 1.00416749999999 x1 x1 + -1.32083416666667 x2 x2 +
   2.22916666666666 x3 x3;
y3ψ[x1_, x2_, x3_] = y2ψ[(x1 - 0.25) / 0.05, (x2 - 0.7) / 0.2, (x3 - 1.5) / 0.5];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0ψ[x1_, x2_, x3_] = Fit[Mψ, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0ψ[x1, x2, x3]
y1ψ[x1, x2, x3]
y2ψ[x1, x2, x3]
Expand[y3ψ[p, h, d]]
розкрити дужки
Expand[y3ψ[O9, P9, Q9]]
розкрити дужки
Expand[y3ψ[0.2, 0.5, 1]]
розкрити дужки
Optψ = FindMinimum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти мінімум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]
Optψ = FindMaximum[{y3ψ[p, h, d], x10 - dx1 ≤ p ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ h ≤ x20 + dx2,
       знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ d ≤ x30 + dx3}, {p, x10 - dx1}, {h, x20 - dx2}, {d, x30 - dx3}]
Plot3D[{y3ψ[p, h, x30]}, {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"p, MPa  ", "h, m  ", "ψ, %  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Blue}]
  сітка  стиль графіка  синій
Plot3D[{y3ψ[x10, h, d]}, {h, x20 - dx2, x20 + dx2}, {d, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"h, m  ", "d, mm  ", "ψ, %  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Blue}]
  сітка  стиль графіка  синій
```

Додаток Е

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ
д-р с.-г. наук, професор
_____Юрій ТКАЛІЧ
«_17_»_____04_____2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ФОП «Боханченко І. С.»
_____Ірина БОХАНЧЕНКО
«_17_»_____04_____2026 р.

А К Т
про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державного аграрно-економічного університету здобувач третього освітньо-наукового рівня освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Лепеть Євген Іванович під керівництвом доцента кафедри тракторів і сільськогосподарських машин, кандидата технічних наук Кобця Олександра Миколайовича, з однієї сторони, і представник ФОП «Боханченко І. С.» (Харківська обл., Берестинський р-н, с. Малі Бучки) агроном Віталій Шевченко, з другої сторони, склали цей акт проте, що запропонований Лепеть Є. І. пристрій для внесення рідких мінеральних добрив до обприскувача проходив виробничу перевірку під час передпосівного внесення карбамід-аміачної суміші (КАС-32) 15.04.2026. Місце проведення дослідів – с. Малі Бучки, Берестинський р-н, Харківська обл. Погодні умови: температура повітря – 14 °С, швидкість вітру 6 м/с. Швидкість руху обприскувача 2,6-3,8 м/с з кроком 0,3 м/с. Норма внесення КАС-32 150 л/га.

В якості критерію прийнято рівномірність розподілення добрив по цільовій поверхні за підвищеної швидкості роботи агрегату.

Результати вимірювань показують, що застосування запропонованого пристрою забезпечило зменшення коефіцієнта варіації поперечного розподілу робочої рідини (ψ): у струменевому режимі – на 2,1% та дефлекторному режимі – на 1,13% нижче порівняно з базовими серійними аналогами.

Завдяки підвищенню рівномірності внесення рідких мінеральних добрив, стабільності формування факела розпилу та утворення краплин в оптимальному розмірному діапазоні (300-700 мкм) було виявлено зменшення втрат добрив в результаті випаровування та знесення вітром на 1,02-2,23%.

Від ДДАЕУ
Доцент кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ, к.т.н
_____Олександр КОБЕЦЬ
Здобувач третього освітньо-наукового рівня освіти ОНП «Галузеве машинобудування»
_____Євген ЛЕПЕТЬ
«_17_»_____04_____2026 р.

Від ФОП «Боханченко І. С.»
агроном
_____Віталій ШЕВЧЕНКО
«_17_»_____04_____2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ
д-р с.-г. наук, професор
_____ Юрій ТКАЛІЧ
«24» 08 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ФГ «ЛАРІНИ»
_____ Іван ЛАРІН
«24» 08 2026 р.

А К Т

про впровадження/використання результатів

науково технічної роботи

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державного аграрно-економоічного університету здобувач третього освітньо-наукового рівня освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Лепеть Євген Іванович під керівництвом доцента кафедри тракторів і сільськогосподарських машин, кандидата технічних наук Кобця Олександра Миколайовича, з однієї сторони, і представник ФГ «ЛАРІНИ» (ЄДРПОУ 20259349, Дніпропетровська обл., Дніпровський р-н, с. Василівка) головний агроном Ларіна Людмила Василівна, з другої сторони, склали цей акт проте, що ФГ «ЛАРІНИ» отримало запропопонований пристрій для внесення рідких мінеральних добрив до серійного штангового обприскувача та технічну документацію до нього.

На базі фермерського господарства «ЛАРІНИ» було виготовлено дослідну партію розроблених комбінованих пристроїв у кількості 40 штук для дообладнання оприскувача господарства. Виготовлені вироби пройшли повний цикл контрольної збірки, стендової перевірки та були задіяні в реальних технологічних процесах господарства під час підживлення сільськогосподарських культур рідкими мінеральними добривами. Практичне застосування виготовленої партії пристроїв підтвердило здатність забезпечувати задану норму внесення та збільшення рівномірності розподілу робочої рідини по цільовій поверхні за підвищених робочих швидкостей агрегату.

Цей акт не створює жодних фінансових зобов'язань для кожної зі сторін. Умови комерційного чи фінансово-правового застосування науково-технічних рішень регулюються окремими двосторонніми угодами.

Від ДДАЕУ
Доцент кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ, к.т.н
_____ Олександр КОБЕЦЬ

Здобувач третього освітньо-наукового рівня освіти ОНП «Галузеве машинобудування»
_____ Євген ЛЕПЕТЬ
«24» 08 2026 р.

Від ФГ «ЛАРІНИ»
головний агроном
_____ Людмила ЛАРІНА
«24» 08 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ
д-р с.-г. наук, професор
_____Юрій ТКАЛІЧ
«26» 08 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Агромодуль»,
к.т.н.
_____Олександр МЕЛЕЖИК
«26» 08 2026 р.

А К Т
про впровадження/використання результатів науково технічної роботи

Цим документом підтверджується, що підсумки науково-технічної розробки, виконаної здобувачем третього освітньо-наукового рівня вищої освіти освітньо-наукової програми «Галузеве машинобудування» Лепетем Євгеном Івановичем під науковим керівництвом доцента кафедри тракторів і сільськогосподарських машин Дніпровського державного аграрно-економічного університету, кандидата технічних наук Кобця Олександра Миколайовича, пройшли практичну апробацію та були задіяні у виробничій діяльності ТОВ «Агромодуль» (ЄДРПОУ 31177688, м. Дніпро, вул. Канатна, 130).

ТОВ «Агромодуль» в особі інженера Микола Мосієнко прийняло дослідний зразок та комплект технічної й конструкторської документації на комбінований пристрій для внесення рідких мінеральних добрив до штангового обприскувача, спроєктований у межах науково-дослідної роботи «Підвищення ефективності механізації технологічних процесів у рослинництві шляхом розробки та впровадження енергетичних засобів і машин для реалізації концепції точного землеробства» (№ ДР 0125U002952)

ТОВ «Агромодуль» зацікавлене у випуску дослідної серії таких пристроїв для внесення рідких мінеральних добрив обсягом 30 одиниць з метою проведення подальших випробувань та організації серійного виготовлення.

Цей акт не створює жодних фінансових зобов'язань для жодної зі сторін. Умови комерційного чи фінансово-правового застосування науково-технічних рішень регулюються окремими двосторонніми угодами.

Від ДДАЕУ
Доцент кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ, к.т.н.
_____Олександр КОБЕЦЬ
Здобувач третього освітньо-наукового рівня освіти ОНП «Галузеве машинобудування»
_____Євген ЛЕПЕТЬ
«26» 08 2026 р.

Від ТОВ «Агромодуль»
Інженер
_____ Микола Мосієнко
«26» 08 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор – проректор з навчальної роботи Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ)
канд. с.-г. наук, проф.
_____ Дмитро ОНОПРІЄНКО
«07» вересня 2026 р.

А К Т
про використання результатів дисертації
на здобуття освітньо-науково ступеня доктор філософії
Лепетя Євгена Івановича
«Обґрунтування параметрів та режимів роботи пристрою для внесення рідких мінеральних добрив»
у навчальному процесі кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ

Комісія у складі: голова – декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, д-р наук з держ. управ., проф. Пугач А. М. та членів – гарант ОПП «Агроінженерія», канд. техн. наук, доц. Теслюк Г.В., гарант ОПП «Машинобудування», д-р техн. наук, старш. дослід., проф. Алієв Е. Б. підтверджує впровадження науково-практичних результатів за дисертаційною роботою на здобуття освітньо-професійного рівня доктор філософії аспіранта Лепетя Євгена Івановича «Обґрунтування параметрів та режимів роботи пристрою для внесення рідких мінеральних добрив» у навчальному процесі кафедри тракторів і сільськогосподарських машин і констатує:

– аспірантом Лепетем Є. І. проваджено в курс дисципліни «Сільськогосподарські машини» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю Н7 «Агроінженерія» наступне: до лабораторної роботи «Машини для захисту рослин» додано вивчення будови та налаштування розробленого пристрою для внесення рідких мінеральних добрив. Матеріальне забезпечення – зразки комбінованих пристроїх для внесення рідких мінеральних добрив, розроблених і створених Лепетем Є. І. у відповідності до дисертаційної роботи;

– аспірантом Лепетем Є. І. впроваджено в курс дисципліни «Моделювання технологічних процесів в агроінженерії» для здобувачів для здобувачів першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю Н7

«Агроінженерія» наступне: практичну роботу «Цифровий аналіз відбитків крапель». Мета роботи – освоїти методологію та набути практичних навичок цифрового аналізу зображень і обробки бінарних матриць відбитків крапель. Матеріальне забезпечення – відсканованні смужки водочутливого паперу, програмне середовище Fiji (ImageJ).

– аспірантом Лепетем Є.І. впроваджено в курс дисципліни «Інжиніринг технічних систем в галузі рослинництва» для здобувачів другого (магістерського) рівня за спеціальністю «Машинобудування» наступне: завдання до лабораторної роботи з дослідження технічних засобів для захисту рослин та внесення добрив. Мета роботи – експериментальне визначення рівномірності поперечного розподілу робочої рідини в лабораторних умовах.

Голова комісії:

декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ,
д-р наук з держ. управ., проф. Андрій ПУГАЧ

Члени комісії

гарант ОПП «Агроінженерія»,
канд. техн. наук, доц. Геннадій ТЕСЛЮК

гарант ОПП «Машинобудування»,
д-р техн. наук, старш. дослід., проф. Ельчин АЛІЄВ

ДОДАТОК Ж

Результати розрахунку техніко-економічної ефективності

Показник	Позначенн	Базовий варіант					Удосконалений варіант				
Марка трактора	–	МТЗ-892					МТЗ-892				
Марка обприскувача	–	ОП-24					ОП-24 з розробленими розпилювачами				
Балансова ціна трактора, грн.	$Б_т$	800000					800000				
Балансова ціна обприскувача, грн.	$Б_м$	450000					467020				
Нормативне річне завантаження трактора, год.	$Т_{зт}$	800					800				
Нормативне річне завантаження обприскувача, год.	$Т_{зм}$	100					100				
Ширина захвату, м	В	24					24				
Швидкість руху агрегату, м/с	$v_а$	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8
Продуктивність агрегату за годину роботи, га/год.	$W_{чч}$	22.5	25.1	27.6	30.2	32.8	22.5	25.1	27.6	30.2	32.8
Коефіцієнт використання часу зміни	$k_{зм}$	0.80					0.80				
Продуктивність агрегату за годину змінного часу, га/год.	$W_{зч}$	17.97	20.04	22.12	24.19	26.27	17.97	20.04	22.12	24.19	26.27
Коефіцієнт використання експлуатаційного часу зміни	$k_{еч}$	0.80					0.80				
Продуктивність агрегату за годину експлуатаційного часу, га/год.	$W_{еч}$	14.38	16.04	17.69	19.35	21.01	14.38	16.04	17.69	19.35	21.01
Кількість обслуговуючого персоналу, люд.	N_i	1					1				
Погодинна ставка оплати по відповідному розряду, грн./год	$т_i$	188.00					188.00				
Коефіцієнт, що враховує різні доплати	$k_д$	1.4					1.4				
Витрати на оплату праці, грн/га	З	18.31	16.41	14.87	13.60	12.53	18.31	16.41	14.87	13.60	12.53
Годинна витрата палива, кг/год	$G_т$	12.40					12.40				
Питомі витрати палива, кг/га	q	0.86	0.77	0.70	0.64	0.59	0.86	0.77	0.70	0.64	0.59
Ціна одного кілограму палива, грн/кг	$Ц_п$	82.00					82.00				
Витрати на паливо, грн/га	П	70.72	63.41	57.46	52.54	48.39	70.72	63.41	57.46	52.54	48.39
Коефіцієнт, що враховує вартість мастильних матеріалів	$k_{ПМ}$	1.3					1.3				

Показник	Позначенн	Базовий варіант					Удосконалений варіант				
Витрати на паливно-мастильні матеріали	ПМ	91.94	82.43	74.70	68.30	62.91	91.94	82.43	74.70	68.30	62.91
Коефіцієнти відрахувань на реновацію, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання обприскувача	$в_{рм}+в_{тм}$	0.30					0.30				
Витрати на реновацію, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання для обприскувача, грн/га	$Р_м$	94.53	84.75	76.80	70.22	64.68	98.10	87.95	79.71	72.88	67.12
Коефіцієнти відрахувань на реновацію, капітальний ремонт, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання трактора	$в_{рт}+в_{кт}+в_{тт}$	0.39					0.39				
Витрати на реновацію, капітальний ремонт, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання для трактора, грн/га	$Р_т$	26.78	24.01	21.76	19.89	18.32	26.78	24.01	21.76	19.89	18.32
Питомі капітальні вкладення, грн/га	К	382.56	342.98	310.83	284.18	261.75	394.39	353.60	320.45	292.98	269.85
Нормативні коефіцієнти ефективності капітальних вкладень	Е	0.15					0.15				
Втрати добрив, %	δ	1.02	1.33	1.64	1.91	2.23	0.00	0.27	0.56	0.91	1.32
Вартість 1 т КАС-32, грн	$Ц_д$	30000.00					30000.00				
Норма внесення, л/га	q	150.00					150.00				
Вартість внесення добрив, грн/га	$С_д$	4545.90	4559.85	4573.80	4585.95	4600.35	4500.00	4512.15	4525.20	4540.95	4559.40
Питомі експлуатаційні витрати, грн/га	С	4777.45	4767.45	4761.94	4757.96	4758.78	4735.13	4722.96	4716.24	4715.62	4720.28
Економія добрив, грн/га	Д	–					42.32	44.49	45.70	42.34	38.50
Питомий економічний ефект за рік, грн/га	$ПЕ_р$	–					40.55	42.90	44.25	41.03	37.29
Обсяг робіт за рік, га	$Q_п$	200.00					200.00				
Економічний ефект за рік, грн	$Е_р$	–					8109.81	8580.52	8850.47	8205.00	7457.76
Строк окупності, років	О	–					0.29	0.25	0.22	0.21	0.22

Додаток И

Список наукових праць здобувача за темою дисертаційної роботи

Статті у наукових фахових виданнях України зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування:

1. Кобець О. М., Пономаренко Н. О., **Лепеть Є. І.** Стан механізації внесення КАС в Україні. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2024. Вип. 54. С. 77–83. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.77-83 *(Здобувачу належить моніторинг ринку сучасних технічних засобів, аналіз конструктивних недоліків існуючих розпилювальних систем для внесення карбамід-аміачної суміші).*

2. Kobets O., **Lepet Ye.** Results of experimental studies of jet nozzles for the application of liquid mineral fertilizers. *Engineering, Energy, Transport AIC.* 2025. Vol. 4, No. 131. P. 32–38. https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-4. *(Здобувачу належить проведення стендових досліджень струменевих розпилювачів, обробка отриманих даних та аналіз закономірностей розподілу рідини).*

3. 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. Вип. 13(44). С. 212–218. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).212-218. *(Здобувачу належить проведення лабораторних експериментів на спеціалізованому стенді та статистична обробка масивів експериментальних даних).*

4. Кобець, О. М., **Лепеть, Є. І.** Результати порівняльних досліджень пристрою для внесення РМД. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2026. Вип. 56. С. 69–77. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.69-77. *(Здобувачу належить проведення виробничих досліджень та цифровий аналіз результатів)*

Патент України на корисну модель:

5. Кобець О. М., Лепеть Є. І. Дефлекторний розпилювач. Патент на корисну модель № 164203 UA, МПК A01M 7/00, u 2025 04632; заявл. 22.09.2025. Опубл. 09.09.2026. Бюл. № 36/2026. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1944278/ *(Здобувачу належить розробка конструктивно-технологічної схеми розпилювача)*.

Тези доповідей на конференціях:

6. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Аналіз способів внесення рідких мінеральних добрив. Наукові основи адаптивного землеробства: матеріали Міжнародної науковопрактичної конференції з нагоди 100-річчя від дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора, академіка ФЕДОРА ТРОХИМОВИЧА МОРГУНА, 90-річчя Агрономічного факультету Дніпровського державного аграрно-економічного університету та Міжнародного дня здоров'я рослин (16–17 травня 2024 року, м. Дніпро). Дніпро: ДДАЕУ, 2024. С. 373–374. *(Здобувачу належить збір та систематизація інформації щодо існуючих способів внесення рідких мінеральних добрив)*

7. **Лепеть Є. І.** Обґрунтування конструкції комбінованого розбризкувача для внесення КАС. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2024. С. 56–58.

8. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Вибір розбризкувачів для внесення КАС. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17-19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 81–83 *(Здобувачу належить аналіз критеріїв вибору розбризкувачів для підживлення КАС).*

9. Кобець О. М., Пономаренко Н. О., **Лепеть Є. І.** Стан механізації внесення КАС в Україні. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2024 р.). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024.

С. 193–199. *(Здобувачу належить збір даних щодо використання технічних засобів для для внесення рідких мінеральних добрив)*.

10. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Оцінка впливу висоти штанги на якість поперечного розподілу КАС струменевими розбризкувачами. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 р.). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 219–221. *(Здобувачу належить аналіз впливу висоти встановлення штанги обприскувача на показники нерівномірності розпилу)*.

11. **Лепеть Є. І.** Результати експериментальних досліджень розбризкувачів для внесення рідких мінеральних добрив. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 2025. С. 51–53

12. Кобець О. М., **Лепеть Є. І.** Класифікація та принципи роботи обприскувачів та розбрискувачів. The 12th International scientific and practical conference «European congress of scientific discovery» (November 10–12, 2025) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2025. P. 17–20. *(Здобувачу належить систематизація та класифікація сучасних обприскувачів і розпилювачів).*