

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Сировицький Кирило Геннадійович

УДК. 631.34: 631.333 +
631.314: 539.21

ДИСЕРТАЦІЯ

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

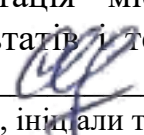
05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Галузь знань – технічні науки

G11(133) – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 К.Г. Сировицький
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: **Шуляк Михайло Леонідович**, доктор технічних наук, професор, перший проректор з НПР Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Кропивницький – 2026

АНОТАЦІЯ

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

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

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

Основні дослідження були присвячені аналізу факторів деградації щілинних гідравлічних розпилювачів, математичному моделюванню їх гідродинаміки та розробці інноваційних методів оперативного діагностування. На основі проведеного аналізу конструктивних особливостей обприскувачів встановлено, що всі машини, які використовуються для хімічного захисту рослин, мають спільну ознаку — робочий елемент для внесення робочої рідини, яким є розпилювач. Таким чином, дослідження та удосконалення розпилювачів має універсальний вплив на забезпечення якості роботи всіх типів обприскувачів, а отримані результати можуть бути використані для модернізації широкого парку сучасної техніки.

Багато вітчизняних та закордонних науковців займалися вивченням питань внесення рідких засобів захисту рослин, оптимізації параметрів штангових систем та покращення дисперсного складу крапель. Тенденції останніх наукових статей присвячені питанням економії дорогих хімічних препаратів, переходу до технологій точного землеробства та суттєвого зменшення екологічного навантаження на довкілля. Проте в реальних виробничих умовах інтенсивного аграрного виробництва технічні параметри

розпилювачів безперервно змінюються під впливом абразивного зношування суспензіями, коливань тиску в магістралях та хімічної деградації. За умов роботи в таких складних експлуатаційних умовах з'являється ще багато недосліджених науковцями питань. І одним із таких критичних питань є виявлення початкових стадій деградації вихідного сопла щілинного гідравлічного розпилювача та формування структури його факела під впливом геометричних змін соплового отвору.

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

Сучасні системи хімічного захисту рослин активно використовують технології імпульсно-кодової модуляції (PWM) та автоматизованого контролю виливу. Встановлено, що до найпоширенішого і технологічно перспективного типу належать щілинні гідравлічні розпилювачі, які є повністю сумісними з PWM-системами та стандартними штанговими тримачами. Їхня популярність обумовлена поєднанням офіційно підтвердженого зниження знесення крапель,

високої біологічної ефективності та економічності в експлуатації. Саме тому дослідженню підлягає взаємозв'язок між просторовою формою соплового отвору щілинного розпилювача та характером розподілу робочої рідини. Існуючі методи дослідження розпилювачів зазвичай фіксують лише загальну норму виливу та форму факела у вільному просторі. Водночас у науковій практиці повністю відсутня методика і дослідний стенд для аналізу якості розпилю безпосередньо на цільову листову поверхню рослини. Виявлений методологічний вакуум зумовлює необхідність розробки інноваційного обладнання, яке здатне визначати секундний вилив розпилювачів та формувати точну геометричну фігуру факела безпосередньо на поверхні листа рослини.

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

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

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

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

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

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

ANNOTATION

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

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

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

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

stages of degradation in the discharge orifice of a hydraulic flat-fan nozzle and the formation of its spray pattern structure under the influence of geometric orifice alterations.

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

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

plants are completely absent. This methodological vacuum necessitates the development of innovative equipment capable of determining the nozzle flow rate per second and generating the exact geometric topography of the spray footprint directly on the plant leaf surface.

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

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

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

distance to the target surface, working pressure, and liquid temperature. The core advantage of the proposed equipment and methodology lies in the capacity to differentially capture microscopic changes in fluid distribution patterns, exposing localized zones of hazardous chemical concentration or, conversely, areas of product deficit.

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

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

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Efficient maize cultivation: pre-sowing seed inoculation system-optimal nozzle pressure and diameter / M. S. Shelest, M. L. Shuliak, A. O. Butenko, O. M. Bakumenko, V. M. Zubko, O. M. Datsko, I. M. Masyk, V. M. Yatsenko, **К. Н. Sirovitskiy**, S. V. Rieznik. *Agronomy Research*. 2024. Vol. 22, no. 2. P. 970–981. (Здобувачу належить побудова і аналіз залежностей розподілу робочої рідини від тиску та форми сопла розпилювача).

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

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

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

4. Мельник В. І., **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л., Панкова О. В. (2021). Методика проведення експериментальних досліджень технічного стану щілинних гідравлічних розпилювачів самохідних обприскувачів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Харків : Вид-во НТУ «ХПІ». Вип. 1. С. 60–66. DOI:

<https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.1.07>. (Здобувачу належить аналіз літературних джерел, узагальнення методики проведення дослідів та висновки).

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

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

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

Тези і матеріали конференцій:

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

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

10. Мельник В. І., Шуляк М. Л., **Сировицький К. Г.** (2022). Методи та методика проведення діагностичних досліджень стану щілинних гідравлічних

розпилювачів для хімічного захисту рослин. *Крамаровські читання* : зб. тез доп. IX Міжнар. наук.-техн. конф. з нагоди 115-ї річниці від дня народження д-ра техн. наук, проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ В. С. Крамарова (24–25 лют. 2022 р., м. Київ). (Здобувачу належить аналіз літературних джерел та постановка методики проведення досліджень).

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

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

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

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

Патенти України:

15. Анікеєв О. І., Коробко А. І., Мельник В. І., Панкова О. В., **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л. (2023) Патент на корисну модель № 153267 Україна, МПК А01В 39/26. Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин. заявник і патентовласник

Державна наукова установа "Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого". — № u202201854 ; заявл. 31.05.2022 ; опубл. 14.06.2023, Бюл. № 24/2023. *(Здобувачу належить результати патентного пошуку та формула стенду)*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	25
1.1. Технологічні рішення та засоби для операції захисту рослин.....	26
1.2 Агротехнологічні вимоги та вплив технічного стану розпилювачів на якість операції захисту рослин.....	28
1.3 Огляд математичного та імітаційного моделювання характеру розпаду струменя рідини для гідравлічного методу розпилу рідини.....	36
1.4 Аналіз методів і засобів діагностування щілинних розпилювачів.....	39
1.5 Висновки по розділу.....	48
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ФАКЕЛА РОЗПИЛУ ЩІЛИННОГО ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗПИЛЮВАЧА.....	50
2.1. Моделювання характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку на базі експериментальних досліджень.....	51
2.2 Загальна гідродинаміка газорідинного потоку при роботі щілинного розпилювача.....	58
2.3 Система сил, які діють на елементи факела.....	64
2.4 Оцінка дії сил, що впливають на формування факела щілинного розпилювача.....	68
2.5 Моделювання гідродинаміки факела розпилу.....	72
2.6 Імітаційне моделювання розподілу робочої рідини в об'ємі факела розпилювання щілинного розпилювача.....	81
2.7 Висновки по розділу.....	93
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	95
3.1 Мета, об'єкт та задачі експериментальних досліджень.....	95
3.2 Методика формування розмірних груп щілинних розпилювачів гідравлічного типу.....	96

3.3 Обґрунтування технічних та конструктивних параметрів лабораторного стенду для дослідження щілинних розпилювачів...	101
3.4 Методика проведення експериментального дослідження щілинних розпилювачів.....	110
3.5 Обґрунтування методики прискореного аналізу характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку.....	112
3.6 Висновки по розділу.....	118
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЩІЛИННОГО ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗПИЛЮВАЧА.....	119
4.1 Дослідження роботи щілинного гідравлічного розпилювача.....	119
4.2 Уточнення області працездатного стану розпилювача на підставі експериментальних даних.....	126
4.3 Перевірка адекватності методики прискореного аналізу характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку.....	128
4.4 Результати польових дослідження самохідного обприскувача Case IH Patriot 3330, який обладнано щілинними розпилювачами.....	132
4.5 Висновки по розділу.....	137
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	141
ДОДАТКИ.....	151
А. Акт впровадження науково-дослідної роботи виробництво СТОВ «Промінь».....	152
Б. Довідка про впровадження результатів досліджень у навчальний процес Сумського НАУ.....	153
В. Акт впровадження науково-дослідної роботи виробництво ФГ «РЕЇНЦІ».....	154
Г. Акт впровадження науково-дослідної роботи виробничу діяльність ТОВ «Сі-Ен-Ейч Індастріал Україна».....	155
Д. Опис патенту на корисну модель UA 153267 U.....	156

ВСТУП

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

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності до вимог законів України «Про продовольчу безпеку України» № 4344-VI від 07.02.2012 р. і «Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу» № 5478-VI від 06.11.2012 р., а також погоджена з такими загальними державними науковими програмами: Постанова Президіуму НАН України № 55 від 05.12.2009 р. «Основні наукові напрямки, найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природних, технічних і гуманітарних

наук на 2009-2013 роки»; Постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 07.09.2011 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямків в наукових дослідженнях і науково-технічних розробок до 2015 року»; програмою НААН України «Пріоритетні завдання аграрної науки України» (період 2008-2015 рр., п. 6.3.3 Розроблення та вдосконалення екологічно безпечних способів і технічних засобів для хімічного захисту рослин, що передбачають економію технологічних матеріалів і високу адаптацію до зміни метеорологічних умов); програмою НААН України «Стратегічні напрями розвитку сільського господарства України на період до 2020 року»; Постановою Президії НААН України «Про пріоритетні напрями наукових досліджень НААН України на 2026-2030 роки»; розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 листопада 2024 р. № 1163-р «Про схвалення Стратегії розвитку сільського господарства та сільських територій в Україні на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках»; НДР «Дослідження впливу технічного стану гідравлічних розпилювачів обприскувача на якість виконання технологічної операції обприскування» (ГДТ № 6-11 від 10 листопада 2023 р., Сумський НАУ, м. Суми).

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

Задачі дослідження:

- проаналізувати стан питання щодо існуючих методів, діагностичних засобів оцінки стану гідравлічних розпилювачів та визначити показники їх технічного стану, що мають найбільший вплив на ефективність хімічного захисту рослин при їх експлуатації;
- розробити математичну модель робочого процесу гідравлічного розпилювача, яка враховує зміну геометрії сопла внаслідок абразивного зношення, коливання тиску та фізико-хімічні властивості робочої рідини;

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

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

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

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

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

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

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- встановлено систему аналітичних залежностей між геометричними параметрами сопла та формою факела, якими враховано дисперсний склад (діаметр) крапель, їхню початкову швидкість, коефіцієнт витрати та кут факела розпилю;
- аналітично обґрунтовано та експериментально підтверджено вплив на характер розподілу робочої рідини змінних параметрів сопла гідравлічного розпилювача, що уможливило встановити межі його справного та працездатного станів.

Отримало подальший розвиток:

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

Удосконалено:

- метод та системно обґрунтовано вплив експлуатаційних факторів на характеристики розпилення та технічний стан гідравлічних розпилювачів, який базується на результатах моделювання гідродинаміки факела розпилю і враховує динаміку змінення геометричної форми сопла в процесі його експлуатації.
- метод експериментального визначення характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку, який підвищує точність вимірювань і базується на ваговому контролі рідини на кожній елементарній ділянці поверхні.

Практична значимість одержаних результатів полягає у розробці та впровадженні комплексу технічних, методичних і програмно-імітаційних рішень, спрямованих на суттєве підвищення якості, екологічної безпеки та економічної ефективності виконання технологічної операції внесення засобів захисту рослин шляхом оперативного інструментального контролю геометрії розпилювачів. Головним практичним здобутком є створення інноваційного

лабораторно-технічного стенда та удосконаленого методу експериментального визначення розподілу робочої рідини, який, завдяки впровадженню вагового контролю на кожній елементарній ділянці, забезпечує підвищену точність вимірювань і дозволив виявити осередки концентрації розчину. На основі обґрунтованої аналітичної моделі гідродинаміки, яка комплексно враховує діаметр крапель, їхню початкову швидкість, коефіцієнт витрати і кут факела розпику, та верифікованої імітаційної CFD-моделі, встановлено чіткі інженерні рекомендації щодо покрокового відбракування зношених розпилювачів. Завдяки розвитку методологічних основ, що враховують динаміку деградації форми сопла, та доведеній гіперчутливості системи до зношення, визначено межі його станів за критерієм граничного коефіцієнта варіації: область справного стану ($a = 0,630-0,682$ мм, $CV \leq 10$ %), працездатного з необхідністю заміни у короткий термін ($a = 0,682-0,709$ мм, $CV = 10-15$ %) та непридатного стану ($a > 0,709$ мм, $CV > 15$ %). Експериментально доведено неефективність спроб компенсації зношення сопел шляхом зміни режимів роботи обприскувача (тиску, швидкості чи висоти штанги), що обґрунтовує обов'язковість регулярних інспекцій за розробленою та валідованою експрес-методикою аналізу 1/2 поверхні обробітку, яка суттєво скорочує час проведення контролю і повністю підтвердила свою ефективність під час польових випробувань для збереження нормативної рівномірності покриття.

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

другого (магістерського) ступеня вищої освіти та ОНП «Галузеве машинобудування» третього (освітньо-наукового) ступеня вищої освіти.

На основі комплексного аналізу технологічних операцій захисту рослин теоретично обґрунтовано та практично реалізовано метод оперативного діагностування щілинних гідравлічних розпилювачів, геометричні зміни сопла яких є визначальними для якості виливу і не можуть бути компенсовані налаштуваннями обприскувача. Шляхом поєднання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та натурних випробувань на розробленому лабораторному стенді досліджено осередки концентрації рідини й отримано статистично значущу криву коефіцієнта варіації (максимальна похибка моделювання 10,5%). Це дозволило деталізувати межі справного ($CV = 10\%$, $a = 0,682$ мм) та працездатного ($CV = 15\%$, $a = 0,709$ мм) станів форсунок, сформулювати чіткі рекомендації щодо їх вилучення з експлуатації за шириною соплового отвору ($a > 0,709$ мм), а також досягти сумарного економічного ефекту від впровадження розроблених рішень у СТОВ «Промінь», ФГ «РЕЇНЦІ» та ТОВ «Сі-Ен-Ейч Індастріал Україна» у розмірі 353 тис. грн поряд із повною інтеграцією результатів у навчальний процес СНАУ.

Результати досліджень пройшли широку виробничу апробацію та впроваджені у виробництво: а) СТОВ «Промінь» (с. Михайлівка, Роменський район, Сумська область), 2023-2024 р., ефективність – 120 тис. грн. (додаток А); б) Сумський національний аграрний університет (м. Суми, Сумська область), 2025 р., – впроваджено в навчально-науковий процес (додаток Б); в) ФГ «РЕЇНЦІ» (с. Софіївка, Первомайський район, Миколаївська область), 2025 р., - ефективність – 98 тис. грн. (додаток В); г) ТОВ «Сі-Ен-Ейч Індастріал Україна» (м. Київ, Україна), 2025 р., ефективність – 135 тис. грн. (додаток Г).

Особистий внесок здобувача.

Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконані спільно з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу

належать такі результати: теоретично досліджено вплив геометрії сопла розпилювача на характер розподілу рідини [12, 13]; теоретично сформульовано постановку задачі та розроблено методику діагностування розпилювачів [108]; теоретично сформульовано задачу та створено алгоритм формування факелу розпилу [101]; виконано аналіз впливу технічних параметрів розпилювачів на якість розподілу рідини по площині [103]; здійснено перевірку адекватності математичної моделі факелу розпилу з урахуванням гідродинаміки [109, 110]; обґрунтовано технічні параметри та конструкцію лабораторного стенду для діагностування технічного стану розпилювачів [107].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались: на щорічних МНПК «Технічний прогрес в АПК» - ХНТУСГ ім. П. Василенка, м. Харків, Україна, 2011-2026 рр.; на IX-тій МНПК «Проблеми конструювання, виробництва і експлуатації сільськогосподарської техніки» - КНТУ, м. Кіровоград, Україна, 2013 р.; на Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні розробки в аграрній сфері» 30 листопада 2017 р. Харків: ХНТУСГ; на Міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки": присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 17-18 жовтня 2020 р. Харків; на науково-практичній конференції викладачів, аспірантів і студентів Сумського НАУ – СНАУ, м. Суми, Україна, 2013-2015 рр.; на Міжнародній науково-технічній конференції «Крамаровські читання» з нагоди 115-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 24-25 лютого 2022 р., м. Київ; на Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в Індустрії» - СНАУ, м. Суми, Україна, 2018-2024 рр.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 14 наукових працях, у тому числі: 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях (з них 1 стаття у виданні, що включено до міжнародної наукометричної бази

даних Scopus), 7 тез у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 1 патент.

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

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основні світові тенденції в землеробстві ведуть до того, що через прагнення до мінімізації обробки ґрунту роль хімічних засобів захисту рослин з року в рік збільшується. Щодо самих технологій внесення гербіцидів, то з тих же причин росте частка обприскування із застосуванням різних штангових знарядь. Інша техніка і технології використовуються не так інтенсивно.

Визначальним чинником ефективності використання засобів захисту рослин є якість їх внесення. Основними критеріями якості обприскування є норма внесення робочої рідини, дисперсність розпилювання, густина покриття краплинами поверхні, що обробляється, та рівномірність розподілу по ній. Усі показники якості обприскування значною мірою залежать від типу, параметрів і режимів роботи розпилювачів. Нині є багато різновидів розпилювачів, тож і постає актуальне питання вибору оптимального з них для конкретних умов експлуатації. Сучасні обприскувачі комплектуються здебільшого гідравлічними розпилювачами, яких є кілька типів.

Зношення розпилювачів є природним процесом. Термін експлуатації розпилювача обмежений, а при неправильному використанні розпилювачів зношення істотно збільшується. На зношення впливають такі чинники: робочий тиск, абразивність робочої рідини, зносостійкість матеріалу розпилювача, інтенсивність експлуатації.

Економічність і екологічність хімічного захисту рослин нерозривно пов'язані з точністю внесення засобів захисту рослин. Забезпечити її можна тільки справною технікою. Піддаючи техніку регулярним перевіркам, досвідчені практики давно переконалися в тому, що приховані дефекти вкрай негативно позначаються на результатах обприскування. Наслідки неправильного дозування засобів захисту рослин проявляються в зниженні врожайності. Рослинам завдається шкода, часто приводить до повної їх

загибелі. Крім того, вони тягнуть за собою зайві витрати і призводять до забруднення навколишнього середовища і продуктів харчування.

1.1 Технологічні рішення та засоби для операції захисту рослин

Зведена таблиця (табл. 1.1) відображає основні конструкційні показники обприскувачів, що узгоджуються з даними виробників і галузевих каталогів. Конкретні параметри залежать від моделі, року випуску та комплектації [1-2].

Таблиця 1.1 – Типи і конструкційні особливості обприскувачів

Тип	Призначення	Бак, л (типово)	Продуктивність, га/год	Фото
Навісний штанговий	Польові культури	400–1200	10–25	
Причіпний штанговий	Польові культури	2000–6000	20–45	
Самохідний штанговий	Польові культури	3000–7000	30–60	
Штанговий з повітропідтримкою	Польові, підвищене проникнення	2000–5000	18–40	
Садовий вентиляторний (air-blast)	Сади / ягідники	1000–3000	8–20	

Баштовий / спальтовий	Виноградники / ягідники	1000–2000	7–15	
Роботизована платформа	Теплиці / сад / ягоди	50–200	1–5	
UAV (багатороторний)	Локальні / труднодоступні ділянки	10–40	5–15	

Як видно з таблиці 1.1, обприскувачі мають різне призначення, конструкцію, тип, але робочий орган незмінний – це розпилювач.

Таблиця 1.2 – Типи і особливості розпилювачів для засобів захисту рослин [3-11]

Тип розпилювачі	Еталонні моделі	Оптимальний тиск (бар)	Розмір крапель (за класифікацією ASABE)	Кількість крапель на см ² (при 200 л/га)	Примітки
Щілинна	Lechler ST TeeJet XR	1.5 – 3.0	Дрібні / Середні	100 – 140	Максимальний біологічний ефект
Двофакельна щілинна	Lechler DF TeeJet TwinJet	2.0 – 4.0	Дрібні / Середні	120 – 160	3D-покриття
Інжекторна низького тиску	Lechler IDK / IDTA TeeJet AIXR	1.5 – 6.0	Крупні / Дуже крупні	30 – 50	Антидрейф
Інжекторна високого тиску	Lechler ID3 TeeJet AI	3.0 – 8.0	Екстремально крупні	15 – 30	Максимальний пробій потоку
Конусна (порожнистий конус)	Lechler TR TeeJet TX ConeJet	3.0 – 10.0	Дуже дрібні	150 – 200+	Ефект туману

Якщо проаналізувати інформацію в табл. 1.2, стає очевидною математична та фізична перевага щілинного типу розпилювачів [12-13] – еталонна дисперсність (30-60 крапель/см²): жоден інший розпилювач при однаковому виливі робочої рідини не здатний видати таку кількість "точок дотику". Якщо розбити одну велику краплю радіусом R на багато дрібних щілинних крапель радіусом r , сумарна площа покриття препаратом зростає в геометричній прогресії. Це забезпечує тотальне покриття. Для контактних фунгіцидів (наприклад, проти фітофторозу чи борошнистої роси) це єдиний спосіб зупинити хворобу. Завдяки високій кількості крапель на см², щілинний розпилювач мінімізує ризик того, що поверхня, яка обробляється, залишиться необробленою. Моделі типу TeeJet XR або Lechler ST починають формувати ідеально рівний факел розпилу вже при мінімальному тиску. Це мінімізує навантаження на помпу обприскувача та запобігає передчасному зношенню системи. Економічна окупність – ці розпилювачі мають найпростішу геометрію каналу, вони майже не забиваються внутрішнім осадом (на відміну від інжекторів, де камери Вентурі забиваються мікрочастинками рентних чи порошкових препаратів) і коштують значно дешевше.

1.2 Агротехнологічні вимоги та вплив технічного стану розпилювачів на якість операції захисту рослин

З точки зору фізіології рослини та біології збудників, вимоги до щільності покриття рідиною плівкою є дуже жорсткими [14-15]. Щільність покриття (кількість крапель на 1 см²) при внесенні гербіцидів становить 20-40 крапель/см², при внесенні системних фунгіцидів та інсектицидів – 40-50 крапель/см², а при внесенні контактних фунгіцидів та інсектицидів – 50-70+ крапель/см². Розмір крапель (дисперсність – VMD) для контактних препаратів – дрібний та середній розпил (150-250 мікронів), щоб покрити мікроскопічні спори чи тіла шкідників. Для системних та ґрунтових препаратів потрібен помірно-крупний та крупний розпил (300-450 мікронів), щоб крапля

гарантовано долетіла до цілі й не знеслася вітром. Рівномірність розподілу робочого розчину (коефіцієнт варіації – CV) по ширині штанги обприскувача не повинен перевищувати 15%.

Ефективність хімічного захисту рослин визначається відповідністю технологічних параметрів обприскування біологічним і агротехнологічним вимогам культури та шкідливого об'єкта. Ключові фактори: дисперсність (якість розпилу), спектр крапель, проникнення, утримання (ретенція), рівномірність покриття. Нижче приведено узагальнені вимоги за ISO/ДСТУ, ASABE, FAO/EPPO та рецензованими дослідженнями [14, 16].

Об'ємно-середній діаметр (VMD, DV0.5) — розмір краплі, при якому половина об'єму розчину міститься у більших краплях, а половина — у менших. Якість розпилу — класифікація спектра крапель за категоріями від дуже дрібних до ультра-грубих [17]. Проникнення — залежить від розміру крапель, повітряної підтримки та густоти листостою [18–20].

Таблиця 1.3 – Орієнтовні діапазони дисперсності на основі S572.1 (точні межі залежать від умов вимірювань [14])

Дисперсність, мкм	Типове застосування	Ризик дрейфу
<60	Аерозолі / спеціалізовані	Високий
61–105	Контактні ЗЗР	Високий
106–235	Контактні фунгіциди / інсектициди	Підвищений
236–340	Більшість польових	Середній
341–403	Системні / ґрунтові	Знижений
404–502	Ґрунтові / добрива	Низький
503–665	Добрива / антизнесення	Низький
>665	Антизнесення	Мінімальний

Правильний вибір розпилювача визначає розмір крапель, рівномірність розподілу робочого розчину та чутливість до знесення, а отже — ефективність і безпеку обробітку. Ідентифікація пропускну здатності «за кольором» уніфікована міжнародним стандартом ISO 10625, який в Україні прийнятий як

ДСТУ ISO 10625:2019 [21]. Випробування гідравлічних обприскувачів регламентують ISO 5682 (в Україні – ДСТУ ISO 5682-1/-2:2019) [22]. Практичні рекомендації щодо вибору розпилювачів і керування знесенням наведені у керівництвах університетів K-State, Virginia Tech, NDSU, UNL та огляді Purdue PPP-153 [26-30].

Таблиця 1.4 – Узагальненні дані по використанню розпилювачів [3-11, 28]

Тип	Приклади моделей	Клас крапель	Стійкість до знесення	Типові задачі
Щілинні	TeeJet XR	середні–дрібні	середня	універсальні ЗЗР
З попереднім дозуючим отвором	Hypro Lo-Drift	крупні	вища	системні гербіциди
Щілинні індукційні	AIXR, TTI, ULD, ID3	дуже крупні-середні; <2% у TTI	дуже висока	гербіциди поблизу чутливих культур
Подвійні щілинні індукційні	Lechler IDKT, ARAG TFA	крупні-середні	висока	фунгіциди / інсектициди
Порожньо-конічні	TeeJet TX / ConeJet, Lechler TR	дрібні-дуже дрібні	низька-середня	контактні ЗЗР, сад / виноград
Стримерні (3–7 струменів)	TeeJet SJ3/SJ7, Lechler FS	суцільні струмені (ультра-крупні)	дуже висока	КАС / УАН, мінімум опіків

Таблиця 1.5 – Види матеріалів, які використовуються у виготовленні розпилювачів [3-11, 28]

Матеріал	Приклади	Плюси	Мінуси	Де доречно
Кераміка	Albuz ADI; TeeJet TXVK ceramic	найвища зносостійкість, стабільна витрата	вища ціна	добрива / абразиви, великі площі
Нержавіюча сталь	ConeJet SSTX	міцність, точність на тиску	знос швидше за кераміку	сад / виноград, високий тиск
Полі- оксиметилен	ARAG TFA; Lechler FS	хімічна стійкість, ціна	швидше зношення, ніж кераміка	масові польові ЗЗР
Надвисоко- молекулярний поліетилен	TeeJet AIXR VP	висока хімічна стійкість / зносостійкість	обмежений модельний ряд	Гербіциди / універсально

На підставі аналізу офіційних нормативів і керівних документів можна впевнено сказати, як технічний стан вузлів обприскувача і коректність налаштувань (тиск, норма витрати, висота штанги, швидкість руху, фільтрація, стабілізація штанги, секційне/індивідуальне керування) впливають на рівномірність поперечного розподілу, спектр крапель, дрейф, а також похибку дози та екологічні ризики і довести, що експлуатаційні налаштування не здатні компенсувати конструкційні дефекти або зношення розпилювачів.

Таблиця 1.6 – Показники якості та нормативні методи оцінки [22, 29-31]

Показник	Метод / критерій
Поперечний розподіл	Вимір розпилення; допуски за методикою на колекторах
Спектр крапель	Категорії VF...UC; Dv0.5 та фракція

Доза (л/га)	Похибка норми не більше допуску; стабільність по секціях
Дрейф	Полюві вимірювання / ліміти за етикеткою
Справність	Інспекція в експлуатації

Нижче узагальнено вплив технічного стану основних підсистем обприскувача на показники якості [31-32].

Таблиця 1.7 – Вплив технічного стану основних підсистем обприскувача на показники якості

Підсистема	Дефект/знос	Прояв	Наслідок (якість)
Насос	Зниження подачі, пульсації, підтікання	Коливання тиску, «дихання» стрілки манометра	Нерівномірність витрати, смуги; доза коливається
Регулятор / клапани	Нестабільний / повільний контроль тиску	Перерегулювання при розгоні / зупинці	Перевнесення / недовнесення на ділянках
Фільтри	Засмічення, пошкоджені сітки	Падіння тиску до секцій	Збільшення поперечного розподілу, засмічення розпилювачів
Шланги / трубопроводи	Тріщини, внутрішні відкладення	Підсоси повітря, локальні втрати тиску	Різні витрати по секціях / кінцевих розпилювачах
Манометр / датчики тиску	Невірне калібрування	Покази не дорівнюють фактичному тиску на розпилювачі	Помилка класу крапель та норми

Секційні клапани	Підтікання / затримка відкриття	Перехресні витоки, запізнення	Локальні перевнесення на клинах / краях
Індивідуальне керування розпилювачми / PWM	Невірне калібрування duty cycle / частоти	Зміна спектра, пульсації потоку	Похибка дози при зміні швидкості; дрейф
Штанга (механіка / демпфери)	Люфти, зношення шарнірів; відсутня стабілізація	Рол, піч, гіттер штанги	Зміна висоти, як наслідок - «зебра»/дрейф
Датчики висоти / автоконтроль	Неправильне налаштування	Невірна висота над ціллю	Недостатнє перекриття або дрейф, підвищене знесення
Бак	Слабка циркуляція / вихрова труба пошкоджена	Осад, неоднорідність робочого розчину	Доза дієвої речовини плаває в часі

Як видно з табл. 1.7, тиск впливає на витрату й спектр крапель, але не усуває гідравлічних пульсацій / нерівномірностей, спричинених дефектами насоса / регулятора. Норма витрати (л/га) забезпечується комбінацією тиску, швидкості та розміру розпилювачів; помилки датчиків і регуляторів призводять до систематичних відхилень. Висота штанги визначає перекриття факелів; нестабільність штанги створює «зебру» навіть при правильній установці висоти.

Налаштуваннями можна лише змістити робочу точку системи, але не усунути джерело нерівномірності: пульсації насоса, витоки у секційних

клапанах, засмічення фільтрів, розбаланс тиску на кінцях штанги, люфти підвісу. ISO 5682-2 показує, що поперечний розподіл визначається геометрією / кінематикою штанги та однорідністю подачі по розпилювачах; спроби «підкрутити» тиск часто підвищують дрейф і не відновлюють перекриття. Директива 2009/128/ЕС та стандарт ISO 16122 акцентують на регулярній інспекції та усуненні причин, а не на експлуатаційних компромісах [31, 33].

Налаштування (тиск, швидкість, висота) не компенсують дефекти розпилювачів – вони лише тимчасово маскують проблему, часто погіршуючи дрейф або розподіл. Офіційні документи [22, 29-33] вимагають регулярної інспекції, калібрування й заміни зношених розпилювачів, як єдиного коректного шляху до сталої якості.

Агровимоги до якості розпилення формуються через вимоги офіційних документів, а саме:

- ISO 5682-2 визначає методи оцінки поперечного розподілу та тиску/витрати на штангових обприскувачах;
- ASABE S572.3 класифікує розпилювачі за спектром крапель (від XF до UC) для оцінки дрейфового ризику;
- ISO 22866 задає принципи польових вимірювань дрейфу;
- ISO 16122 встановлює вимоги до періодичної інспекції обприскувачів у використанні, включно зі станом розпилювачів.

Керівництво FAO щодо наземного внесення встановлює практичні межі щодо висоти штанги, однаковості розпилювачів, швидкості вітру, та забороняють змішування типорозмірів на одній штанзі [34-37]. Узагальнені показники представлені в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Ключові показники якості роботи розпилювачів

Показник якості	Критерій / метод оцінки
Рівномірність поперечного розподілу	Вимірювання на патернаторі / колекторах; тиск / витрата; розподіл та допуски
Спектр крапель	Категорії за Dv0.1/Dv0.5/Dv0.9; класи (VF...XC)

Дрейф (знесення)	Польові вимірювання дрейфу та метеоумови
Стан і придатність обприскувача	Інспекція в експлуатації (візуальна й функціональна)
Правила експлуатації	Не змішувати розпилювачі; коректна висота штанги; вітер

ASABE/ANSI та регламент рекомендують порогове правило заміни: якщо продуктивність розпилювачів відрізняється більш ніж на $\pm 15\%$ від номіналу або між собою – розпилювачі підлягають заміні, оскільки це супроводжується погіршенням патерну і зростанням частки дрібних крапель [34, 38].

Таблиця 1.9 – Дефекти розпилювачів і наслідки для якості [31-34, 35-37]

Дефект/стан	Прояв	Наслідок для якості
Зношення отвору (ерозія)	Підвищення витрати ($>10\%$ від номіналу), зміна кута факела	Нерівномірність, зміна спектра крапель, як наслідок – підвищення дрейфу
Часткове засмічення	Смуги в патерні, асиметрія факела	Недовнесення в смугах, підвищене біологічне «вікно»
Пошкодження прокладки / корпусу	Підтікання, пульсації	Локальні перевнесення, втрати препарату
Різномісні / різнорозмірні розпилювачі в секції	Відмінні кути й витрати	Високий коефіцієнт поперечного розподілу
Зміна кута факела через знос	Фактичний кут не дорівнює паспортному	Перекриття погіршується навіть при корекції висоти

Як видно з табл. 1.9, регулювання тиску, висоти штанги чи швидкості змінює лише гідродинамічні режими, але не відновлює початкову геометрію каналу/крайок розпилювачі. Ерозія збільшує прохідний переріз і «розмиває» крайки, що змінює структуру зсувів у факелі та розподіл енергії розпилення

(зміна $Dv_{0.5}$ і частки дрібних крапель). Збільшення тиску для повернення норми витрати ще більше зсуває спектр у дрібні краплі (різко зростає дрейф) і погіршує поперечний розподіл при незмінній геометричній асиметрії.

Офіційні документи надають два ключові аргументи: класи спектрів крапель [34] прив'язані до конкретної геометрії й умов — зміна геометрії переводить розпилювач в інший клас та ISO 5682-2 фіксують, що відхилення патерну/перекриття зумовлені саме геометрією та неоднорідністю витрат, а не лише тиском. Тому коректна дія — діагностика (вимір витрати кожного розпилювача, огляд факела) і заміна/ремонт, а не «підкручування» тиску [34, 37].

Технічний стан розпилювачів є визначальним чинником якості розпилення. Зношення або дефекти змінюють витрату, кут факела і спектр крапель, що безпосередньо погіршує рівномірність і підвищує дрейф. Регулювання тиску, висоти штанги чи швидкості руху не усуває геометричних змін у соплі і не повертає розпилювач до початкового класу крапель — отже не може компенсувати втрату якості. Єдино правильний шлях — регулярна інспекція, контроль витрати, дотримання вимог до спектра крапель та правил щодо експлуатації; своєчасна заміна зношених розпилювачів при відхиленні витрати понад $\pm 15\%$.

1.3 Огляд математичного та імітаційного моделювання характеру розпаду струменя рідини для гідравлічного методу розпилю рідини

Систематизація підходів до моделювання первинного та вторинного розпаду рідинного струменя при гідравлічному способі розпилю (plain-orifice, pressure-swirl, airblast з мінімальним піддувом), охопивши класичні математичні моделі, рівняння балансу популяцій, напівемпіричні моделі типу KH/RT та сучасні CFD-методи захвату інтерфейсу (VOF, Level-Set, Front-Tracking, SPH, LBM) є ключовим моментом для розуміння динаміки розпаду струменя рідини при гідравлічному методу розпилю рідини [40-44].

Динаміку розпаду струменю рідини визначають числа Вебера:

$$We = \frac{\rho L v^2}{\sigma}, \quad (1.1)$$

де ρ – густина; L – характеристична довжина; σ – коефіцієнт поверхневого натягу; v – швидкість;

Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}, \quad (1.2)$$

де V – характерна швидкість потоку, м/с; μ – динамічна в'язкість кг/(м·с); ν – кінематична в'язкість, м²/с;

та Онезорге:

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho L}} = \frac{1}{\sqrt{La}}. \quad (1.3)$$

де La – число Лапласа.

Класичні роботи базуються на теорії Релея-Плато для капілярної нестійкості циліндричного струменя (моно-дисперсний розпад) і подальших узагальненнях для зсувних та інерційних режимів розпаду [42-44]. Релей-Плато (капілярна) нестійкість для тонкого в'язкого струменя у спокійному газі показує, що довгохвильові збурення зростають і призводять до первинного розпаду на краплі зі співставним із діаметром струменя [42, 44]. Зсувно-аеродинамічна (Kelvin–Helmholtz, КН) нестійкість домінує за значних We та різкості швидкостей між газом і рідиною; лінійний аналіз хвильового зростання лежить в основі КН-моделей розпаду [45, 46]. Релея-Тейлора (RT) нестійкість проявляється на прискорених інтерфейсах та часто використовується для опису вторинного розпаду крапель [47, 48]. Еволюцію дисперсної фази описує рівняння Вільямса, тобто кінетичне рівняння для функції чисельної щільності

крапель з урахуванням переносу, сил, випаровування/росту, розпаду та коалесценції [49]. Чисельне розв’язання рівнянь балансу популяцій (PBE) в поєднанні з CFD реалізують за допомогою методів моментів: QMOM, DQMOM та QBMM, що дає змогу моделювати розподіли розмірів без відстеження кожної краплі [50-53]. Wave/КН демонструє ріст хвиль КН на поверхні струменя і визначає первинний розпад – краплі ін’єктуються «блобами» розміру сопла з подальшим фрагментуванням [45, 51-54]. КН–RT – це гібридна схема КН для первинного, RT для вторинного розпаду, яка широко використовується у розрахунках дизельних і газотурбінних факелів [47, 52-56].

Табличні та кореляційні підходи для SMD (Nukiyama–Tanasawa; Hiroyasu–Arai; Lefebvre та ін.) забезпечують швидкі оцінки середнього діаметра крапель за параметрами потоку та геометрією розпилювача [55-59].

Таблиця 1.11 – Класифікація моделей розпаду [60-71]

Клас моделі	Що описує	Виходи
Аналітичні (Rayleigh / КН / RT)	Порогові умови нестійкості, масштабні оцінки	Довжина розпаду, масштаби крапель
PBE/Вільямс + (Q)MOM	Еволюцію розподілу розмірів з розпадом / коалесценцією	SMD, спектр розмірів, моменти
КН, RT, КН–RT	Первинний / вторинний розпад у Е–L схемі	SMD, кут / пенетрація, D32(t)
Кореляції SMD	Оціночні формули для конкретних типів розпилювачів	D32, іноді кут / пенетрація
CFD з відстеженням інтерфейсу (VOF / LS / FT / SPH / LBM)	Топологію інтерфейсу, формування	Польові змінні, спектр через постобробку

Оцінюючи внесок авторів дослідження [40], слід відзначити формування нового наукового тренду — наскрізного зв'язаного моделювання багатофазних систем. Наукова концепція базується на постулаті про «гідродинамічний ефект пам'яті струменя», згідно з яким характер первинного руйнування рідинного стовпа детермінований мікроскопічними збуреннями, що виникли ще до виходу рідини у відкритий простір. Математичний апарат даного напрямку базується на комбінуванні двох фундаментальних чисельних підходів (CFD) – Ейлерове моделювання багатофазного середовища та Лагранжеве відстеження дискретних часток.

Проведеними дослідженнями встановлено, що моделі математичного та імітаційного моделювання характеру розпаду струменя рідини відрізняються рівнем деталізації: від швидкої оцінки (аналітичні) до детального фізичного моделювання (CFD).

1.4 Аналіз методів і засобів діагностування щілинних розпилювачів

Серія міжнародних стандартів ISO 5682 є фундаментальною методологічною основою [22]. Вони регламентують аналітичні підходи, фізико-технічні критерії та конструктивні вимоги до випробувань гідравлічних розпилювальних систем.

Головною метою є визначення рівномірності масового потоку рідини в двовимірній системі координат. Стандарт нормує використання горизонтального розподільчого стенда, тобто – патернатора (patternator), який являє собою матрицю паралельних канавок завширшки 50 ± 1 мм. Випробування мають проводитися в закритих екранованих приміщеннях при температурі повітря від $+10$ °C до $+25$ °C та відносній вологості не менше 60%, щоб нівелювати конвекційні повітряні потоки та випадкове випаровування мікрокрапель.

Дослідженню технологічних процесів і робочих органів для хімічного захисту рослин присвячені праці вчених В.І. Мельника, А.С. Кобця, Б.В. Онищенка, В.В. Погорілого та інших [72-81].

Розподіл розпилення можна виміряти різними способами. У виробників розпилювачів, а також дослідних та експериментальних станцій є випробувальні стенди для розпилення, які розташовані на стандартизованій або реальній штанзі.

Фірма Lechler GmbH має дослідний стенд, який виготовлений у вигляді жолобу для збирання рідини та рухомим столом з закріпленим на ньому чутливим до вологи папером (рис. 1.9.). Такий стенд має довжину, яка відповідає довжині штанги обприскувача. Стенд дозволяє проводити оцінку норми виливу рідини та рівномірності її розподілу [82].



Рисунок 1.9 – Дослідний стенд фірми Lechler GmbH

В компанії TeeJet Technologies для статистичних вимірів по всій ширині штанги використовується вимірювальний стенд [83], який розміщується під штангою в зафіксованому положенні, а невеликий вимірювальний стенд переміщується по всій штанзі (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Вимірювальний стенд компанії TeeJet Technologies

Система вимірювального стенду являє собою електронну систему виміру кількості рідини в кожному каналі і розрахунок об'ємів. Якщо необхідна більш детальна інформація про якість розпилення і покриву, можливо використовувати динамічну систему – розпилення кольорового індикатора. Цей метод також можна використовувати, якщо необхідно виміряти розподіл по всій ширині штанги.

Також компанія TeeJet Technologies використовує обладнання Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) і лазери системи Oxford VisiSizer (рис. 1.12) для того, щоб охарактеризувати розпилювачі, отримані розміри капель і іншу важливу інформацію [83].

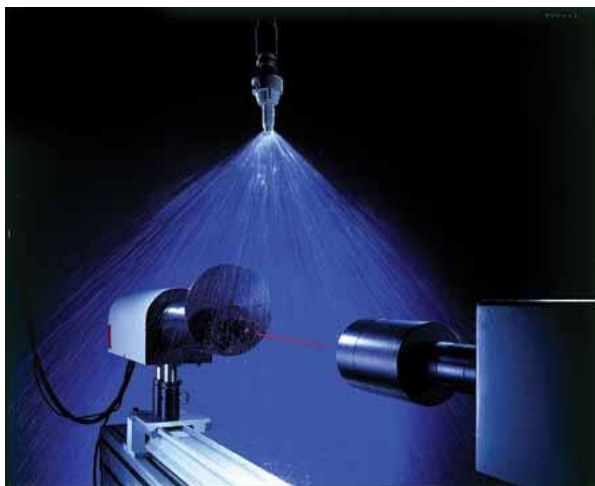
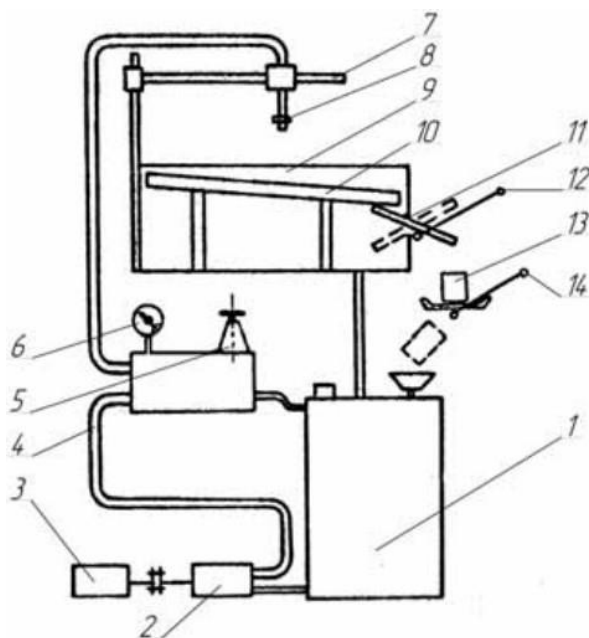


Рисунок 1.12 – Лазерний стенд системи Oxford VisiSizer

Роботи по дослідженню рівномірності розподілу рідини по ширині факелу розпилювачів та визначення ступеня розподілу рідини по довжині штанги також проводив у Дніпропетровському державному агротехнологічному університеті О.М. Кобець [84].

Експерименти проводилися на гідравлічному стенді, схема якого наведена на (рис. 1.13). На ньому при зміні тиску від 0,15 до 0,3 МПа та висоти від 0,30 до 0,50 м проводили забір рідини (води), у жолобки, стікаючи по яких, вода потрапляла у мірні циліндри об'ємом 250 мл. Час проведення досліду контролювали секундоміром.

Кожний дослід проводився п'ять разів. При цьому визначалися та заносилися до таблиць такі параметри, як тиск в напірному трубопроводі, витрата рідини через розпилювач, розподіл рідини по ширині факела та штанги. Під час проведення дослідів також контролювався такий показник, як температура рідини, яку використовували в досліді. Вона контролювалася за допомогою термометру.

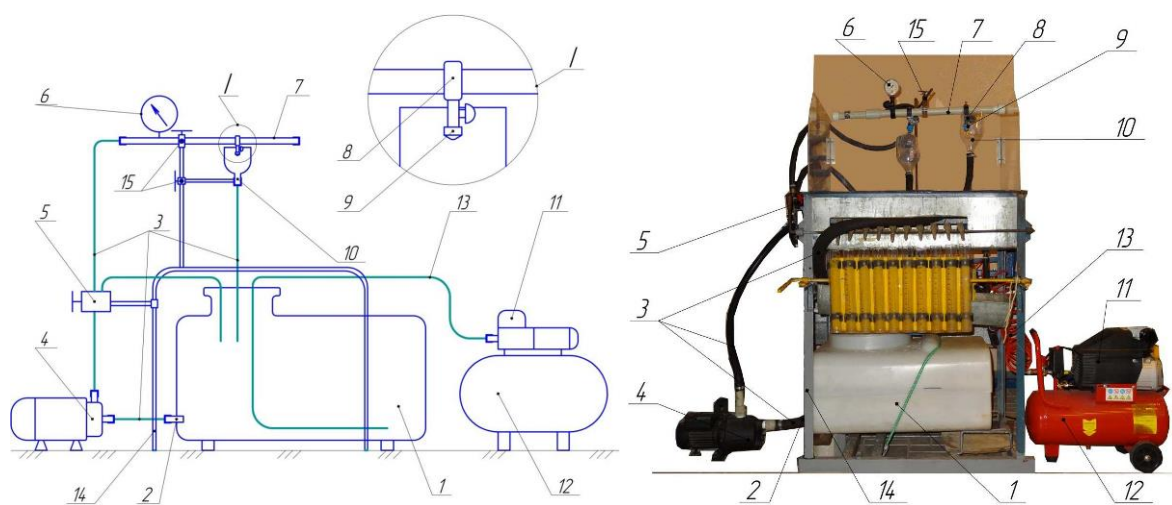


- 1 – бак; 2 – насос; 3 – електродвигун; 4 – трубопроводи; 5 – регулятор тиску;
6 – манометр; 7 – кронштейн; 8 – розпилювач; 9 – ванна; 10 – станок з
перегородками; 11 – жолоб; 12, 14 – важелі; 13 – мірні стакани.

Рисунок 1.13 – Схема гідравлічного стенду

Також відомий дослідний стенд [73], принципова схема та загальний вид якого приведено на (рис. 1.14).

Програмою експериментальних досліджень розпилювачів передбачалось визначення впливу наробітку розпилювача на його експлуатаційні показники: хвилинну витрату та розподіл рідини по ширині факелу. Методикою проведення експериментальних досліджень передбачалось визначення відносного ресурсу розпилювачів при використанні робочої рідини з домішкою 20 г/л мікрозернистого оксиду алюмінію, яку треба замінити після 50 проходжень через розпилювач.



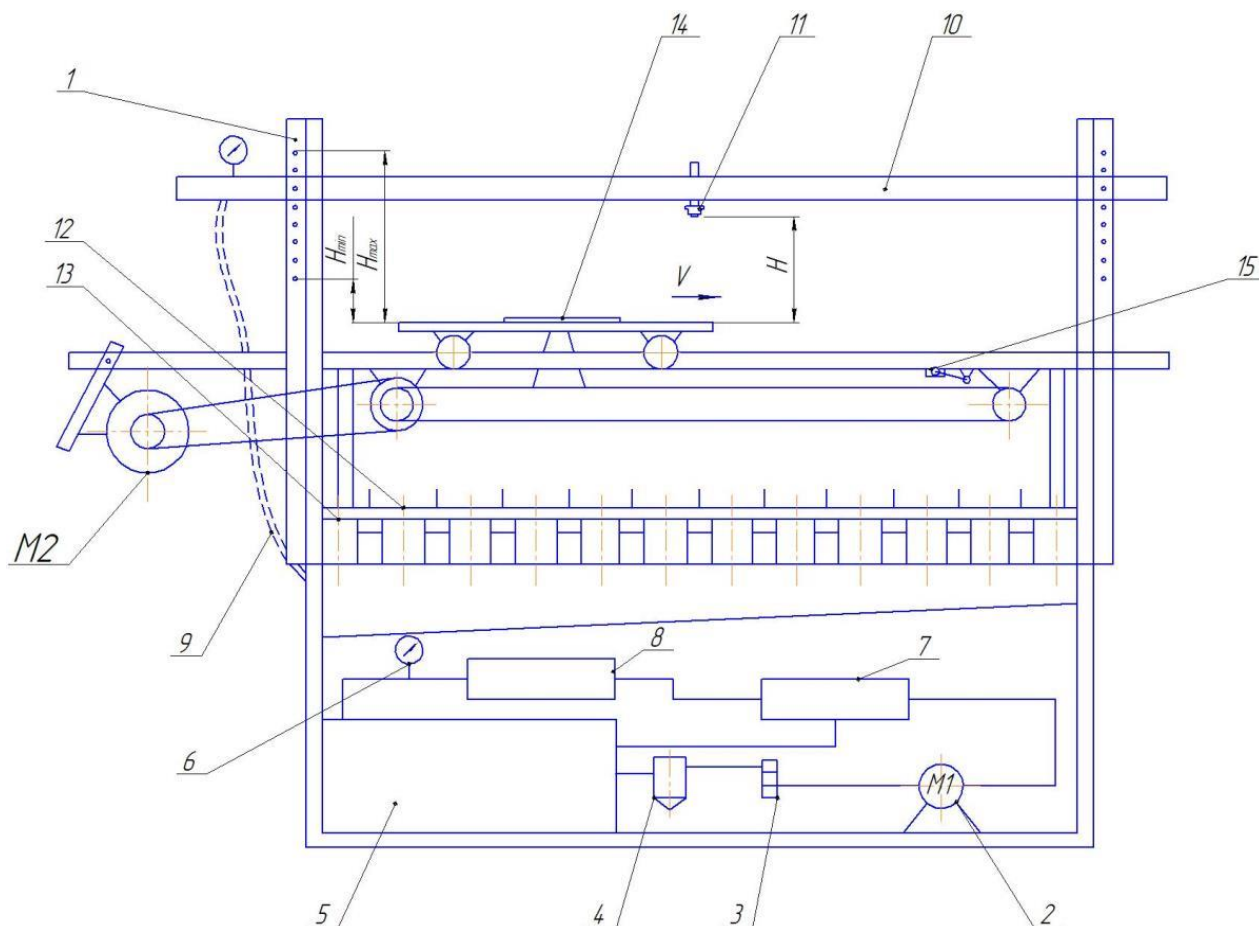
а – принципова схема; б – загальний вид; 1 – місткість; 2 – забірник; 3 – рукав;
4 – насос; 5 – регулятор тиску; 6 – манометр; 7 – штанга; 8 – розпилююча
головка; 9 – розпилювач; 10 – лійка; 11 – компресор; 12 – ресивер;
13 – повітропровід; 14 – рама; 15 – тримач

Рисунок 1.14 – Стенд для ресурсних випробувань розпилювачів

У ході проведення досліджень періодично визначалась хвилинна витрата рідини через розпилювач, розподіл її по ширині факелу та за допомогою мікроскопу фіксувались геометричні параметри соплового отвору щілинного розпилювача.

Відомий стенд для дослідження розпилюючих пристроїв (рис. 1.15), який був створений з метою дослідження якісних показників роботи розпилювачів, в основу якого закладено принцип «рухомого поля» [85]. Конструкція та принцип

роботи стенду дозволяють проводити не тільки гідравлічні дослідження розпилюючих пристроїв, а і технологічні, завдяки наявності рухомої площини, яка імітує відносний рух технічного засобу при виконанні процесу внесення робочої рідини.



- 1 – рама стенду; 2 – електродвигун; 3 – насос; 4 – фільтр; 5 – бак; 6 – манометр;
 7 – регулятор тиску; 8 – пульт керування; 9 – трубопровід; 10 – штанга;
 11 – розпилювач; 12 – стіл-класифікатор; 13 – мензурки; 14 – рухома площа з водочутливим папером; 15 – вимикач кінцевий

Рисунок 1.15 – Конструктивна схема стенду для дослідження розпилюючих пристроїв

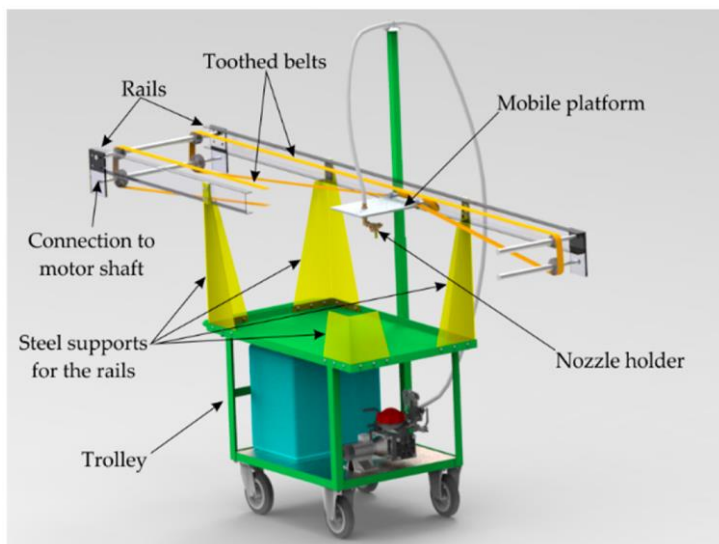


Рисунок 1.16 – Патернаційний стенд згідно ISO 5682-2 [22]

Стенд (рис. 1.16) призначений для вимірювання поперечного розподілу робочої рідини розпилювачів. Конструкція складається з мобільної рами на колесах, рейок із зубчастими ременями, які переміщують розпилювач над жолобами. Система дозволяє автоматично відтворювати рух обприскувача та реєструвати рівномірність подачі по ширині факела (рис. 1.17).

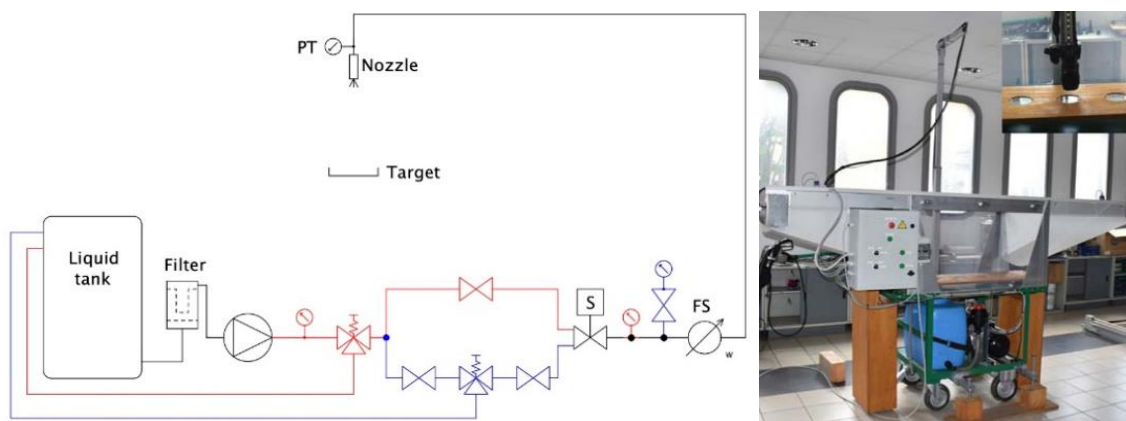


Рисунок 1.17 – Установка Malvern Spraytec для спектра крапель [86]

Рідина з резервуара подається насосом через фільтр і клапани до розпилювача. Лазерний промінь проходить крізь зону розпилу, а датчики фіксують дифракційну картину, за якою обчислюється спектр діаметрів.



Рисунок 1.18 – Лабораторний стенд PDPA для вимірювання розміру та швидкості крапель

Установка PDPA (рис. 1.18) застосовується для локального вимірювання параметрів крапель у зоні розпилу. Лазерні промені формують інтерференційне поле, у якому кожна крапля розсіює світло; аналіз фазового зсуву сигналів дає значення діаметра та швидкості частинок.



Рисунок 1.19 – Стенд PIV/PLIF для візуалізації факела розпилу [87]

Стенд PIV/PLIF (рис. 1.19) – це сучасний експериментальний комплекс для дослідження просторової структури та швидкісного поля факела розпилу. Система складається з лазерного підсвічування у вигляді світлового листа та високошвидкісної камери. Методи PIV/PLIF дозволяють вимірювати поле швидкостей крапель і концентрацію рідини у факелі.

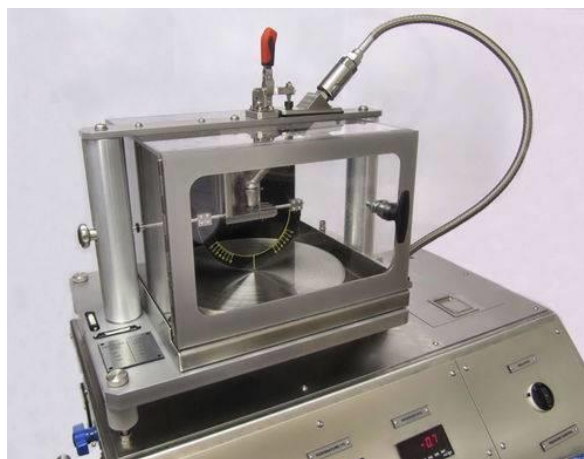


Рисунок 1.20 – Стенд прискореного тесту на зношення розпилювачів [88]

Лабораторна установка (рис. 1.20) призначена для оцінки довговічності гідравлічних розпилювачів під дією абразивних домішок у робочій рідині. Розпилювач фіксується в камері з прозорим оглядовим вікном, де через неї прокачується рідина із заданим вмістом абразиву.

Встановлено, що методи, які застосовують в дослідженнях якості розпилу, використовуються як для обприскувача в цілому (на підприємствах-виробниках розпилювачів), так і дослідження окремо взятого розпилювача.

Аналіз сучасних методів і засобів діагностування розпилювачів свідчить, що традиційний підхід обмежується оцінюванням норми виливу окремого розпилювача та геометрії факела розпилу. Разом з тим, наразі бракує обґрунтованої методики та експериментального стенда для дослідження якісних показників розпилення безпосередньо на оброблювану поверхню. Це зумовлює необхідність розроблення методичного та апаратно-конструктивного забезпечення для визначення витратних характеристик розпилювачів і моделювання геометрії плями контакту факела розпилу безпосередньо на поверхні листка рослини.

1.5 Висновки по розділу

1. Встановлено, що до найпоширенішого типу розпилювачів належать щілинні гідравлічні розпилювачі. Такі розпилювачі сумісні з системами PWM та стандартними тримачами, що полегшує модернізацію парку техніки. Їх популярність обумовлена завдяки поєднанню офіційно підтвердженого зниження знесення (до 95%), високої ефективності, сумісності з сучасними системами та економічності експлуатації.

2. Доведено, що технічний стан розпилювачів є визначальним чинником якості внесення засобів захисту рослин. Зношення або дефекти змінюють витрату, кут факела і спектр крапель, що безпосередньо знижує показник рівномірності і підвищує дрейф. Регулювання тиску, висоти штанги чи швидкості руху обприскувача не усуває геометричних змін у соплі розпилювача і не повертає її до початкового класу крапель – отже не може компенсувати втрату якості. Підтверджено, що єдино правильний шлях – регулярна інспекція, контроль витрати, дотримання вимог до спектра крапель та правил щодо експлуатації. Визначальними оціночними показниками функціонування розпилювача є: коефіцієнт варіації розподілу рідини CV, який не повинен перевищувати 15 %, дисперсний склад (діаметр) крапель та корневий кут факелу розпилю (форма факелу).

3. Існуючі методи визначення ступеня зношення розпилювачів є неефективними для реалізації у аграрних підприємствах, оскільки тривалі за часом, можуть викликати простой техніки та потребують великих витрат ресурсів. Відсутність експрес-методу дослідження якості функціонування розпилювачів має негативний вплив на екологію і знижує економічну ефективність вирощування сільськогосподарських культур.

4. Проведеним аналізом моделювання роботи розпилювачів та методів і засобів діагностування встановлено, що існуючі підходи не дозволяють виявити чіткі взаємозв'язки між ступенем деградації соплового отвору розпилювача та якістю захисту рослин, тому доцільним є розробка нових способів

діагностівання, які дозволять характеризувати справний та працездатний стани щілиних розпилювачів, які обмежені граничними значеннями коефіцієнта варіації розподілу рідини CV.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ФАКЕЛА РОЗПИЛУ ЩІЛИННОГО ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗПИЛЮВАЧА

Аграрне виробництво України постійно розвивається і активно використовує передові наукові та технологічні розробки галузі. Зважаючи на досвід передових країн – виробників аграрної продукції, можна стверджувати, що в найближчі роки відбудеться повний перехід в область інтелектуального землеробства та використання систем точного землеробства, безпілотних чи автоматичних систем виробництва. Тому забезпечення конкурентоздатності вітчизняного аграрного виробництва не можливе без впровадження та розвитку подібних систем. Саме використання систем точного землеробства дозволяє забезпечити необхідну точність виконання технологічної операції захисту рослин і нівелювати вплив від збільшення проходів при застосуванні інтенсивної технології. Проте використання систем точного землеробства суттєво підвищує вимоги до технічних засобів, що використовуються при проведенні операції захисту рослин. Ефективність виконання цього процесу знаходиться у прямій залежності від точності дозування об'ємів робочої рідини для конкретної частини поля, тому при використанні цих технологій вимоги до функціональних параметрів роботи оприскувача, особливо щодо якості розпилення та швидкодії реакції на корегуючі впливи, зростає на багато рівнів. Як і будь-який інший прецизійний компонент розпилювачі згодом зношуються. Зношування розпилювачів буває складно виявити. Невеликі зміни у продуктивності можуть привести до проблем з якістю, стічними водами, хімічними речовинами. Витрати, спричинені використанням зношених розпилювачів, можуть бути досить відчутними: десятки тисяч доларів на рік чи більше. З огляду на аналіз джерел інформації у 1 розділі постає суттєва наукова проблема раннього виявлення розпилювачів, які наближаються до граничного зношення або втратили працездатність. Методи візуального спостереження не дозволяють чітко провести таку оцінку. Тому виникає необхідність визначення

граничних значень зміни розмірів соплового отвору розпилювачів, при яких настає параметрична відмова і розпилювач потрібно замінити.

2.1 Моделювання характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку на базі експериментальних досліджень

В роботі проф. Мельника В.І. [72] проведений ґрунтовний аналіз роботи розпилювачів та запропонована модель, яка дозволяє визначити характер розподілу рідини по поверхні обробітку, що базується на експериментальному дослідженні. Отримані параметри роботи розпилювача описуються прямою розпилу ω з площею $(a_2 - a_1) \times (b_2 - b_1)$ в координатах O_{xyz} (рис. 2.1).

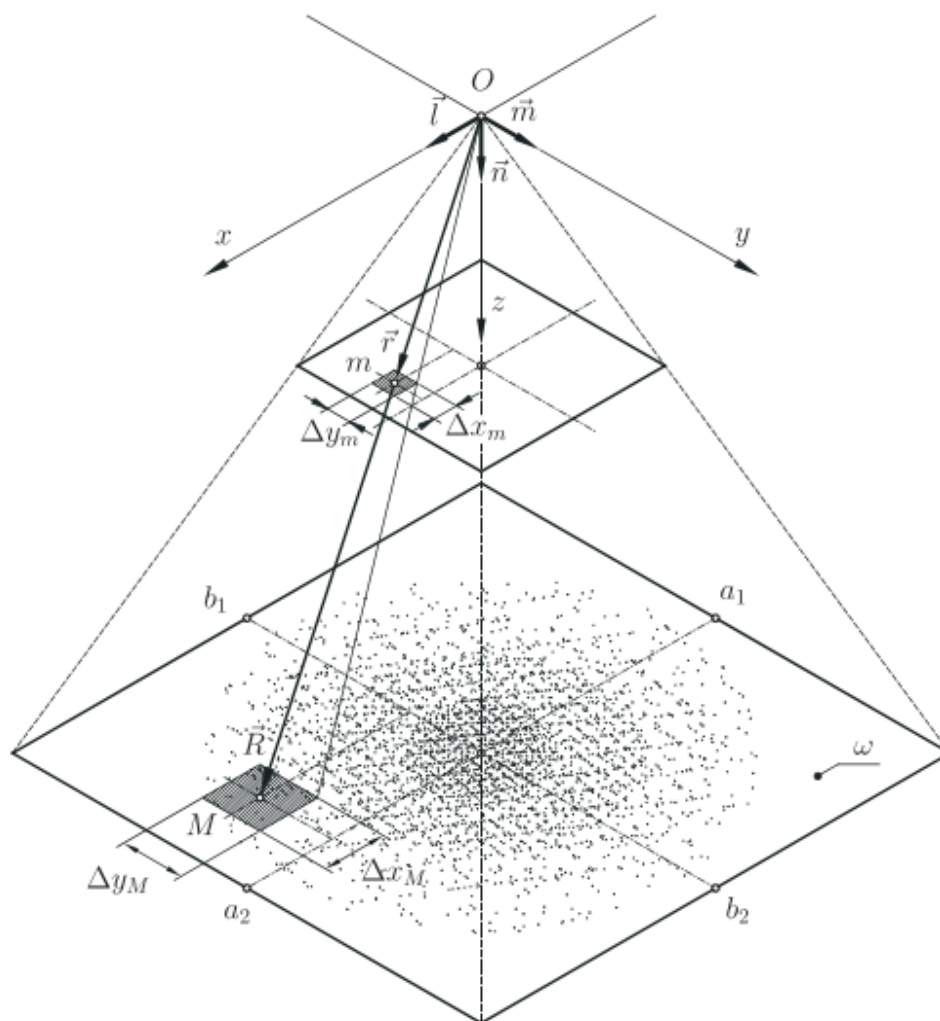


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема факелу розпилу з прямою розпилу ω площею $(a_2 - a_1) \times (b_2 - b_1)$ в координатах O_{xyz} і допоміжні побудови для визначення векторного поля $B(x, y, z)$ потоку рідини

Розглянемо ортогональну систему координат O_{xyz} , базисний репер якої – $(O, \vec{i}, \vec{m}, \vec{n})$, [92]. Позитивний напрямок осі O_z – вертикально вниз. Вважаємо, що кінцевий елемент проточної частини розпилювача розташовується на початку (точка O) цієї системи координат O_{xyz} . Орієнтований розпилювач у напрямку осі O_z . У процесі його роботи рідина, що витікає з нього, розпилюється, утворюючи при цьому конусоподібний факел розпилу. Вершина цього факелу розташовується у початковій точці ($x = y = z = 0$) системи координат O_{xyz} .

Вважатимемо, що поверхня, на яку розпилюється рідина, розташовується на віддаленні $z = h$ (відстань установки розпилювача по відношенню до оброблювальної поверхні) від координатної площини $O_x O_y$ і паралельна останній. Для цієї площини ($x, y, z = h$) двомірний розподіл рідини вважаємо відомим (отримано експериментальним шляхом). Задається це функцією $f = f(x, y)$. За своєю фізичною суттю ця функція є кількістю рідини, яка потрапляє на одиницю площі протягом одиниці часу у точці з координатами x, y та $z = h$.

В якості площі розпилу обираємо прямокутну область ω зі сторонами, паралельними осям координат O_x і O_y . За розмірами ця область $\omega = \{x, y: a_1 \leq x \leq a_2; b_1 \leq y \leq b_2\}$ така, що повністю охоплює (можливо із «запасом») всю територію, на яку потрапляє хоч скільки завгодно мало рідини. У межах ω , яка фактично є областю визначення функції розподілу $f(x, y)$, на основі експериментальних даних, шляхом збору рідини, що потрапляє на кожен елементарний майданчик площі розпилу ω можна отримати її сіткове уявлення $f = f_{k,l}(x, y)$, де індекси k і l , задаються сіткою $\omega_{k,l} = \{x_k, y_l: a_1 = x_0 < x_1 < \dots < x_n = a_2; b_1 = y_0 < y_1 < \dots < y_m = b_2\}$. Виконавши сплайн-інтерполяцію за допомогою кусково-бікубічної функції [90-91] розумітимемо:

$$f(x, y) = \sum_{i,j=0}^3 \alpha_{i,j}^{k,l} (x - x_k)^i (y - y_l)^j, \quad (2.1)$$

$$(k = 0, 1, \dots, n; l = 0, 1, \dots, m),$$

коли $x \in [x_k, x_{k+1}]$, $y \in [y_l, y_{l+1}]$. На сітці $\omega_{k,l}$ сплайн-функція $f(x, y)$ (2.1) приймає задані значення $f_{k,l}$, які, в свою чергу, дорівнюють вільним членам її поліномів:

$$f(x, y) = \sum_{i,j=0}^3 \alpha_{i,j}^{k,l} (x - x_k)^i (y - y_l)^j, \quad (2.2)$$

в межах ω двічі неперервно диференційована:

$$f(x, y) \in C^2(\omega), \quad (2.3)$$

впродовж зовнішнього контура Γ площі ω ($\Gamma \in \omega$) виконується умова:

$$\left. \frac{\partial^2}{\partial v^2} \right|_{\Gamma}, \quad (2.4)$$

де v – зовнішня нормаль до межі Γ області ω . Крім вже приведеного, у відношенні функції $f(x, y)$, а, отже, і у відношенні її сплайн-подання (2.1), в силу специфіки реального процесу розподілу рідини по площі ω , які вони відображають, вкажемо, що $f(x, y)|_{\omega} \geq 0$. Приклад такого розподілу для конкретного розпилювача приведений на (рис. 2.2).

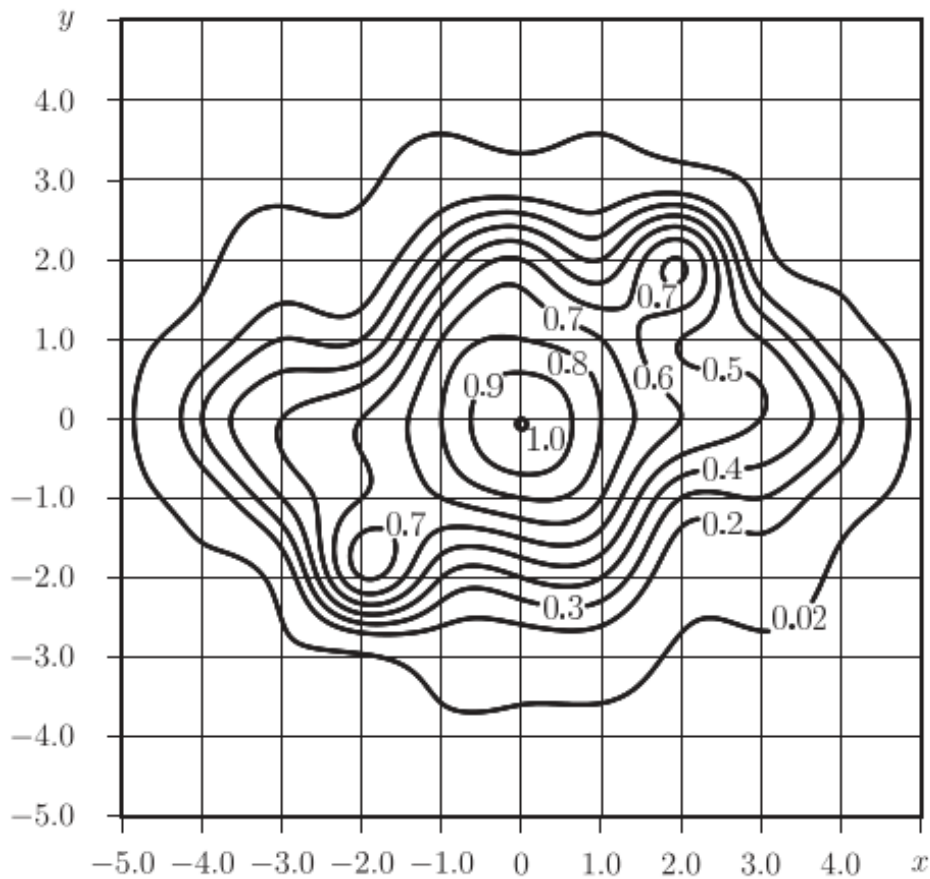


Рисунок 2.2 – Приклад розподілу рідини розпилювачем при віддалені h і нормальній орієнтації його відносно площини напилювання ω розміром $(a_2 - a_1) \times (b_2 - b_1)$. Ізолінії відповідають кількості рідини, яка потрапляє на одиницю площини в одиниці часу

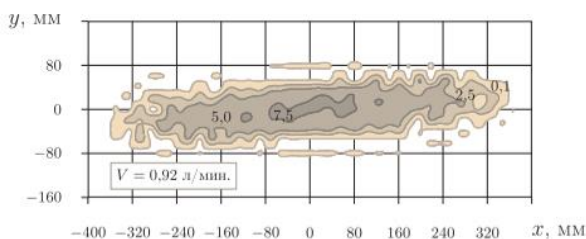
На ньому функція $f(x, y)$, виражена у вигляді сукупності ізоліній. В подальшому розподіл $f(x, y)$ будемо називати нормованою двомірною характеристикою розпилювача. Використовуючи представлену методику можна отримати ізолінії витрати рідини.

Приймемо, що факел розпилу рідини повністю розташовується всередині об'єму піраміди Ω , основою якої є пляма розпилу ω , а вершиною точка O , початку системи координат O_{xyz} . Саме цю піраміду будемо вважати факелом розпилу. Застосування сплайн-інтерполяції дозволяє стандартизувати аналітичне представлення функції $f(x, y)$ розподілу рідини розпилювачем, а отже, і всі наступні викладки. Тому ж сприяє використанню прямокутної області ω , ортогональної сітки ω_k , а також подання факелу розпилу Ω у вигляді піраміди.

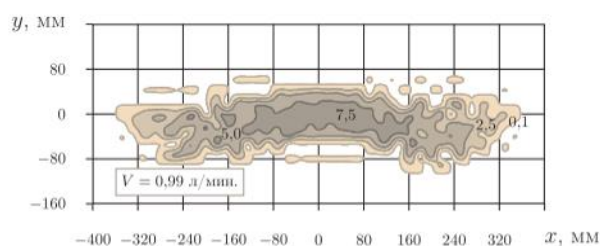
Передбачається, що система координат O_{xyz} нерухома, але при відомому напрямку переміщення розпилювача при встановленні його на самохідний обприскувач, коли вектор переміщення розпилювача збігається з віссю O_y або паралельний їй, під терміном «розподіл рідини по поверхні обробітку» слід розуміти «розподіл рідини вздовж осі O_x ».

Зважаючи на отримані в роботі [72] результати можна стверджувати, що навіть нові розпилювачі з дефектами виробництва не дозволяють виконувати технологічну операцію з відповідною якістю. Тобто розподіл рідини вздовж осі O_x буде нерівномірним, у результаті чого на окремі ділянки поверхні обробітку буде потрапляти кількість рідини (більша або менша), ніж це визначають нормативні вимоги.

Приклад розподілу робочої рідини по поверхні обробітку (у вигляді сукупності ізоліній) для нових розпилювачів без дефектів (рис. 2.3 а) та для розпилювачів з наявними виробничими дефектами (рис. 2.3 б). Розподіл приведений до осі O_x для оговорених розпилювачів наведений на рис. 2.4 а, б відповідно у вигляді гістограм.

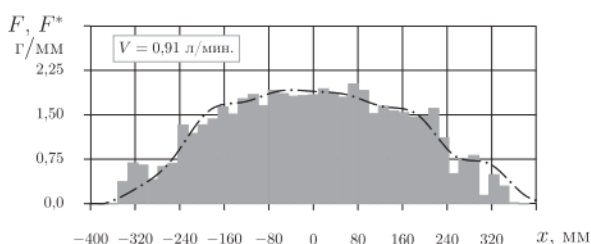


а)

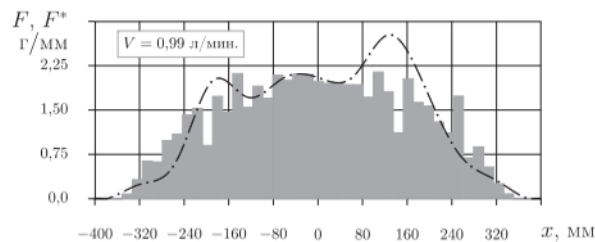


б)

Рисунок 2.3 – Розподіл робочої рідини по поверхні обробітку розпилювачем без дефектів (а) та з наявними виробничими дефектами (б) [72]



а)



б)

Рисунок 2.4 – Розподіл рідини вздовж осі O_x розпилювачем без дефектів (а) та розпилювачем з виробничими дефектами (б) [72]

З (рис. 2.3), (рис. 2.4) видно, що виробничі дефекти, які викликали зміну геометричних параметрів соплового отвору розпилювача при незмінному тиску та відстані до поверхні обробки, викликають зміну кількості виливу рідини за хвилину та її розподіл у середні плями розпилу. При цьому гістограми розподілу рідини вздовж осі O_x дозволяють розрахувати коефіцієнт варіації для розпилювачів встановлених на штанзі, що є підставою для висновку щодо працездатності обраних розпилювачів.

Для розрахунку коефіцієнту варіації необхідно врахувати перекриття між сусідніми розпилювачами, розміщеними на штанзі. При його визначенні враховується кут розпилу робочої рідини, відстань від розпилювача до поверхні обробітку та відстань між розпилювачами на штанзі (рис. 2.5).

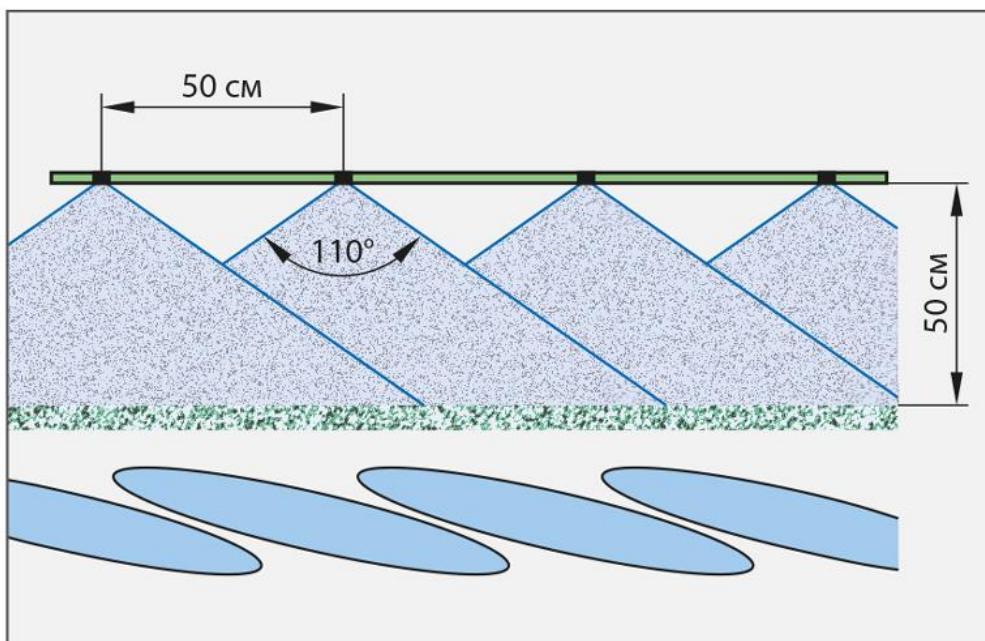


Рисунок 2.5 – Перекриття розподілу рідини між сусідніми розпилювачами з кутом розпилювання 110° та відстанню до поверхні обробітку 50 см

Враховуючи представлене на (рис. 2.5) перекриття, гістограми розподілу рідини для визначення сумарного коефіцієнту варіації по ширині захвату обприскувача суміщаються відповідно (рис. 2.6).

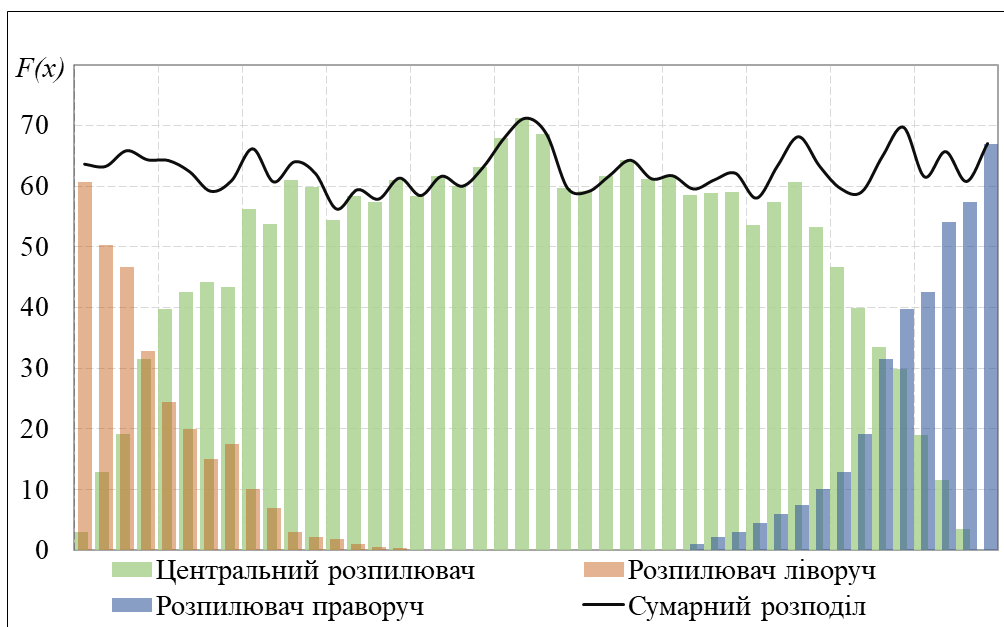


Рисунок 2.6 – Розподіл рідини по ширині захвату обприскувача з врахуванням перекриття від сусідніх розпилювачів

Отриманий коефіцієнт варіації для сумарного розподілу рідини характеризуватиме якість виконання операції захисту рослин, а при досягненні його значення у 15 % визначить втрату працездатності розпилювачів та необхідність їх заміни або відновлення.

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

Оговорений метод має ще один недолік – не можливість встановлення впливу характерних змін соплового отвору на розміри крапель у об'ємі факелу розпилу. При теоретичному моделюванні необхідно врахувати оговорений вплив, для чого в розрахунку розпилювачів існує ряд формул:

1) середній арифметичний діаметр:

$$d_{ap} = \frac{\sum n_i d_i}{N}, \quad (2.5)$$

де n_i – число крапель діаметра d_i ; $N = \sum n_i$ – сума всіх крапель.

При такому методі опосередкування питомий вміст крапель визначається їхньою відносною кількістю; тим часом велика кількість малих крапель становить лише незначну частину загальної маси розпорошеної рідини, а це означає, що таке середовище не враховує розподілу маси рідини по краплях.

2) середньомасовий діаметр:

$$\frac{\sum n_i d_i}{G} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3}, \quad (2.6)$$

де g_i – вага крапель розміру d_i ;

3) в деяких випадках за середній приймається розмір краплі, відношення об'єму якої до її поверхні дорівнює відношенню сумарного об'єму всіх крапель до їх поверхні (середній діаметр по Заутеру):

$$d_s = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}, \quad (2.7)$$

4) середній діаметр виводять також з умови, що відношення діаметра краплі середнього розміру до її об'єму дорівнює відношенню суми всіх діаметрів крапель до об'єму всіх крапель:

$$d_p = \sqrt{\frac{1}{\sum \frac{V_i}{d_i^2}}}, \quad (2.8)$$

5) за середній можна приймати також діаметр краплі, об'єм якої дорівнює середньому арифметичному об'єму всіх крапель:

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i}}. \quad (2.9)$$

При аналізі вище наведених фактів та попередніх результатів встановлено, що модель формування факелу розпилення робочої рідини повинна враховувати взаємозв'язок між формою соплового отвору розпилювача та характером розподілу рідини по площі обприскування; враховувати зміну типорозмірів крапель, що утворюються при розпаді робочої рідини та враховувати чинники, які зумовлюють дисперсність розподілу; дозволяти визначити межі зміни розміру та форми соплового отвору, які будуть характеризувати його, як не роботоздатний для подальшої експлуатації.

Також при моделюванні необхідно обґрунтувати, чи є достатнім для розпилювачів мати одновимірну характеристику розподілу рідини по ширині обприскування чи необхідно отримувати двовимірний розподіл рідини по площі плями розпилення, при нормованому віддаленні від контрольної поверхні.

2.2 Загальна гідродинаміка газорідинного потоку при роботі щілинного розпилювача

Замінімо реальний факел на $N+1$ (де $N \geq 1$) взаємопроникних та взаємодіючих континуумів, які називатимемо фазами. Будь-яка фаза з номером n є гомогенною сумішшю $m_n \geq 1$ компонентів. Тоді фазу з номером $N+1$ називатимемо суцільною (дисперсійною), інші – дисперсними. У такому разі,

число N фактично дорівнює числу фракцій, на які розбиваємо сукупність крапель даного розпилю, і, в такий спосіб, характеризує ступінь однорідності властивостей даної фракції, отже, і точність розрахунку.

Для опису процесів, що відбуваються у факелі, введемо сукупність систем координат: інерційну, що пов'язана з «нерухомим» спостерігачем (систему відліку) $Ox_1'x_2'x_3'$ і $N+1$ систему координат $Ol_{1n}l_{2n}l_{3n}$, які пов'язані з фазами. Вважаємо, що фази рухаються відносно системи відліку, але кожна з них нерухома відносно своєї, супутній їй, системі координат.

Прийmemo, що у початковий час всі координати збігаються. Нехай координати деякої точки n фази в початковий момент часу будуть $l_{1n} = x_1^0$, $l_{2n} = x_2^0$, $l_{3n} = x_3^0$ або в загальному вигляді: $l_n = x_n^0$. В наступні моменти координати l_n для фіксованої точки n фази, очевидно, залишаються незмінними, а координати x в системі відліку змінюються за законом руху n фази:

$$x_n = x_n(\tau, l_n). \quad (2.10)$$

Як відомо, швидкість точки l фази n відносно системи відліку спостерігача визначається частинною похідною за часом та при фіксованих значеннях координат l_n виражається залежністю виду:

$$\vec{v}_n(l_n, \tau) = \frac{\partial x_n(l_n, \tau)}{\partial t}. \quad (2.11)$$

Швидкість індивідуального об'єму V фази n , тобто об'єму, що містить одні й самі точки n -ой фази, є швидкістю центру тяжіння цього об'єму і визначається рівнянням виду:

$$\vec{v}_n^{(v)} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\int_V \vec{x}_n dV}{\int_V dV}. \quad (2.12)$$

За визначенням, швидкість точки є межею відношення швидкості індивідуального об'єму, коли останній стягується до цієї точки:

$$\vec{v}_n = \lim_{V \rightarrow x_n} v_n^{(v)}. \quad (2.13)$$

Не визначатимемо окремо швидкість кожного компонента, вважаючи, що внутрішньофазову дифузію на даному етапі можна не враховувати. Крім швидкості в будь-якій з областей факела, кожна фаза характеризується об'ємом, який вона займає в загальному об'ємі гетерогенної системи, кількістю речовини та продуктивністю джерел кожного з компонентів, кількістю руху та продуктивністю джерел (силами) кількості руху, та іншими функціями.

Для кожної такої функції Φ , визначеної в деякій області Ω , знайдемо межу відношення Φ до об'єму V цієї області, коли останній стягується до точки x :

$$\lim_{V \rightarrow x} \frac{\Phi}{V} = \frac{d\Phi}{dV}. \quad (2.14)$$

Зазначимо, що похідна за об'ємом від величини Φ в точці x називається щільністю Φ в точці x .

Серед функцій Φ є такі, які мають здатність зберігатися в ізолюваному об'ємі, вільному від джерел. Серед них нас цікавитимуть надалі лише кількості речовини та руху.

Нехай визначені таким чином щільність величини, що зберігається є ρ , продуктивність (інтенсивність) джерел – ψ , швидкість перенесення – $\vec{v}$.

Запишемо рівняння закону збереження цих величин (вважаємо, що ρ сприймається як скалярна величина, наприклад для кількості руху – його проекція). Для цього розглянемо довільний об'єм, обмежений замкненою поверхнею S .

Нехай $\vec{v}^*$ – швидкість точок поверхні відносно спостерігача. Зміна кількості величини, що зберігається, Φ , за час $\tau_2 - \tau_1$ визначається різницею інтегралів:

$$\Delta\Phi = \int_V \rho dV \Big|_{\tau=\tau_2} - \int_V \rho dV \Big|_{\tau=\tau_1}, \quad (2.15)$$

де $\rho = \rho(x)$.

Ця зміна виникла в результаті перетікання (визначеного величиною Φ) через межі області зі швидкістю $\vec{v}^* - \vec{v}$ та дії джерел, інтенсивність яких ψ , тобто:

$$\Delta\Phi = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left[\oint_S \rho(\vec{v}^* - \vec{v}) dS + \int_V \psi dV \right] d\tau. \quad (2.16)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (2.15) і (2.16), за умови $\tau_2 \rightarrow \tau_1$ отримуємо:

$$\frac{d}{d\tau} \int_V \rho dV = \oint_S \rho(\vec{v}^* - \vec{v}) dS + \int_V \psi dV. \quad (2.17)$$

Для похідної у лівій частині рівняння (2.17) маємо:

$$\frac{d}{d\tau} \int_V \rho dV = \int_V \frac{d\rho}{d\tau} dV + \int_V \rho \vec{v}^* d\vec{S}. \quad (2.18)$$

Обмежимося усталеними відносно спостерігача (стаціонарними) процесами. Це означає, що всі локальні похідні за часом дорівнюють нулю, і рівність (2.17) з урахуванням (2.18) можна записати у вигляді:

$$\oint_S \rho \vec{v}^* d\vec{S} + \oint_S \rho(\vec{v} - \vec{v}^*) d\vec{S} = \int_V \psi dV. \quad (2.19)$$

Таким чином, врахування руху замикаючої поверхні з довільною швидкістю $\vec{v}^*$ не призводить до узагальнення, оскільки члени, що містять $\vec{v}^*$ у явному вигляді, знищуються, і вираз закону збереження для будь-якої швидкості руху поверхні S представляється формулою, яка не залежить явно від цієї швидкості:

$$\oint_S \rho \vec{v} d\vec{S} = \int_V \psi dV. \quad (2.20)$$

Нехай тепер V – об'єм довільного струмка потоку (векторної трубки) з малим нормальним перетином S_n – таким, що можна прийняти всі змінні, що входять до рівняння (2.20), незмінними за перерізом. Нехай також уздовж струмка потоку можна задати деякий параметр λ – такий, що змінні, які входять у рівняння (2.20), вважатимуться функціями λ (наприклад, час руху зі

швидкістю $\vec{v}^*$). Тоді через те, що потік через бічну поверхню трубки потоку дорівнює нулю, а напрямки вектору $d\vec{S} = \vec{S}$ на «торцевих» перерізах при необмеженому їх зближенні протилежні, з виразу (2.11) отримаємо:

$$d\lambda(\rho\vec{v}\vec{S}) = \psi dV. \quad (2.21)$$

Таким чином, величина $\rho\vec{v}\vec{S}$, що міститься між двома нескінченно близькими перерізами трубки потоку, проведеними при значеннях параметра λ і $\lambda + d\lambda$ дорівнює добутку функції джерел ψ на об'єм трубки потоку між цими двома перерізами.

Залежність (2.21) назвемо характеристичною. Вона може бути основою для побудови конкретних моделей розпилювання рідини.

Потрібно враховувати, що побудувати конкретну модель – це означає замкнути рівняння (2.21), тобто, задати вирази для ρ і ψ , умови на межі і співвідношення, що відсутні. Слід зазначити, що залежність (2.21) є частинною похідною рівняння (2.20), що містить умови на межах.

Щоб записати вирази для щільностей, визначимо частку об'єму, який займається в точці x фазою n в об'ємі гетерогенної суміші:

$$\beta_n = \lim_{V \rightarrow x} \frac{V_n}{V}, \quad n = \overline{1, N+1}. \quad (2.22)$$

Об'ємну частку $N+1$ -ї (суцільної) фази позначимо ε і називатимемо порізністю. З урахуванням адитивності об'ємів фаз щільність кількості речовини n -ї фази визначиться добутком $\beta_n \rho_n$, де ρ_n – щільність речовини n -ої фази при $\beta_n = 1$, тобто коли вся система складається тільки з фази з номером n , причому

$$\rho_n = \sum_{m=1}^{m_n} \rho_{mn}, \quad (2.23)$$

де ρ_{mn} – масова концентрація (щільність) m -го компонента в n -й фазі.

Оскільки розгляд особливостей масопереносу виходить за рамки цього дослідження, приймаємо припущення про ідеальне перемішування компонентів

усередині фаз. Об'ємні частки фаз у гетерогенних системах пов'язані співвідношенням виду:

$$\varepsilon = 1 - \sum_{n=1}^N \beta_n. \quad (2.24)$$

За аналогією із щільністю фази, щільність кількості руху виразимо залежністю виду $\beta_n \rho_n \vec{v}_n$. Врахуємо, що якщо енергія фаз є сумою кінетичної та внутрішньої енергій, а остання – функція теплоємності та температури, то для процесів розпилення, які можна прийняти ізотермічними, закон збереження енергії є просто наслідком законів збереження речовини та кількості руху.

Фази вважатимемо нестискними, що з інженерного розрахунку справедливо при швидкостях $v \approx 0,2C$ (де C – швидкість звуку), тому щільність фази ρ_n є лише функцією концентрацій компонентів, що складають дану фазу.

Розглянемо вирази для інтенсивностей джерел ψ . Вважатимемо, що міжфазні переходи відсутні. Тоді права частина співвідношень (2.21) дорівнює нулю. Отже, диференціал у лівій частині береться від постійних вздовж ліній потоку величин:

$$\beta_n \rho_n \vec{v}_n \vec{S}_n = q_n = \text{const}. \quad (2.25)$$

У рівнянні закону збереження кількості руху величина ψ є об'ємною щільністю зовнішніх по відношенню до даної фази сил. Тому замість ψ використовуватимемо загальноприйняте позначення f_z для проекції сили на вертикальну вісь (приймаємо спрямовану вниз) та f_r – для радіальної складової. Кожна з них є функцією двох незалежних змінних: z і r ; крім радіуса r елементарного струмка буде використовуватися також S – площа довільного перерізу, побудованого годографом радіус-вектору r .

Розкладемо величини f_i на складові: загальна сила дорівнює сумі сил опору f_{io} , тиску f_{ip} , ваги f_{ig} і так далі. Тоді врахування нового ефекту зводиться до додавання чергового доданку до правої частини рівняння (2.20).

Нехай кожній точці області Ω відповідає вектор $\vec{v}$, тобто задано векторне поле $\vec{v} = \vec{v}(x_1, x_2, x_3)$. Припустимо, що похідні $\partial v_i / \partial x_i$ існують і безперервні. Визначимо дивергенцію поля:

$$\operatorname{div} \vec{v} = \lim_{V \rightarrow x} \frac{\oint_V \vec{v} d\vec{S}}{dV}. \quad (2.26)$$

Тоді для будь-якої гладкої поверхні S , що обмежує замкнутий об'єм V з області Ω , справедлива формула Остроградського-Гауса:

$$\int_V \operatorname{div} \vec{v} dV = \oint_S \vec{v} d\vec{S}. \quad (2.27)$$

Для скалярного поля P є наступний варіант формули Остроградського-Гауса:

$$\int_V \operatorname{grad} P dV = \oint_S P d\vec{S}. \quad (2.29)$$

Застосовуючи співвідношення (2.27) до (2.20) та враховуючи довільність об'єму, отримаємо рівняння, що описує в диференціальній формі систему законів збереження, еквівалентну системі (2.20) всюди всередині області, що обмежена поверхнею S :

$$\operatorname{div} \rho \vec{v} = \psi. \quad (2.30)$$

З урахуванням зроблених припущень запишемо об'ємну щільність проекції сили для основних ефектів, що впливають на рух фаз. До них віднесемо поки лише сили, зумовлені статичним тиском, опором відносного руху фаз і масові сили.

2.3 Система сил, які діють на елементи факела

Сили, що зумовлені статичним тиском. Відомо що за відсутності частинок об'ємна щільність сил, викликаних тиском, дорівнює його градієнту, взятому зі зворотним знаком:

$$\vec{f}_P = -\operatorname{grad} P. \quad (2.31)$$

Іншими словами, у точках, вільних від дисперсної фази, справедливе рівняння (2.31); у точках, де знаходиться дисперсна фаза, сила f_p на суцільну фазу не діє, оскільки сама суцільна фаза відсутня. Таким чином, загальна сила тиску, що діє на суцільну фазу в об'ємі простору V , дорівнює:

$$\int_{V_\varepsilon} \vec{f}_p dV = \int_{V_\varepsilon} (-gradP) dV, \quad (2.32)$$

де інтеграл береться за об'ємом V_ε , що зайнятий тільки суцільною фазою, а середня об'ємна щільність сили визначається шляхом поділу сили на аналізований просторовий об'єм V :

$$\vec{f}_p = \int_{V_\varepsilon} \frac{\vec{f}_p dV}{V} = \int_{V_\varepsilon} \frac{(-gradP) dV}{V}. \quad (2.33)$$

Ділячи і помножуючи останню рівність на V_ε і враховуючи, що $\varepsilon = \lim_{V \rightarrow x} \frac{V_\varepsilon}{V}$, отримуємо $f_p = -\varepsilon gradP$. Аналогічно можна поступити і з рівнянням (2.31), враховуючи, що об'єму V_n , який зайнятий n фазою, відповідає обмежуюча n фазу зовнішня, по відношенню до об'єму V , поверхня $S_n = \beta_n S$. Таким чином, для будь-якого n маємо:

$$f_{p_n} = -\beta_n gradP. \quad (2.34)$$

Масові сили. Щільність масових сил записується в вигляді:

$$\vec{f}_g = \beta_n (\rho_n - \rho_{N+1}) \vec{g}. \quad (2.35)$$

де $\vec{g}$ – вектор прискорення вільного падіння.

Сили опору. Найбільш важливим є точний облік сил міжфазової взаємодії, викликаної різницею швидкостей дисперсної та дисперсійної фаз, оскільки в більшості випадків дія сили опору є вирішальною. Сила опору виражається рівнянням виду:

$$\vec{f}_o = \frac{3}{4} C_k \frac{\beta \rho_{N+1} v_0^2}{d_k} \frac{\vec{v}_0}{v}, \quad (2.36)$$

і залежить від відносної швидкості руху фаз $\vec{v}_0$ і v та від коефіцієнта гідродинамічного опору C_k .

Припускаючи, що вираз для доданків у правих частинах системи (2.20) має явний вигляд, проінтегруємо його по нескінченно малому об'єму елемента трубки потоку перетином S і довжиною dn . В цьому випадку величини, що входять у рівняння, в межах виділеного об'єму вважатимуться незмінним. Для правих частин це зведеться до множення на величину об'єму $dV = \vec{S}dn$:

$$\lim_{diam V \rightarrow 0} \int_V \psi dV = \psi(\vec{S}dn). \quad (2.37)$$

Використовуючи для лівих частин рівняння (2.28) теорему Остроградського-Гауса, перейдемо від об'ємних інтегралів до поверхневих і запишемо кожен з них у вигляді суми трьох інтегралів по поверхнях $S_{бiч}$, S_1 , S_2 , що складають повну поверхню трубки потоку:

$$\int_V div p \vec{v} dV = \int_{S_{бiч}} \rho \vec{v} d\vec{S} + \int_{S_1} \rho \vec{v} d\vec{S} + \int_{S_2} \rho \vec{v} d\vec{S}. \quad (2.38)$$

У реальних процесах рух суцільної фази визначається рухом дисперсної фази внаслідок обміну кількістю руху. Тому заздалегідь задати закон зміни швидкості суцільної фази вздовж траєкторії руху частинок дисперсної фази неможливо. У зв'язку з цим визначимо рух суцільної фази частково, напрямом поля швидкостей.

Система рівнянь визначення швидкості фаз (2.30) є системою рівнянь у частинних похідних, оскільки кожне рівняння можна розглядати, як звичайне диференціальне, лише вздовж траєкторії руху тієї фази, на яку воно записано. Для цього зробимо припущення про поле швидкостей суцільної фази: приймемо, що напрямки руху фаз збігаються (що вектори для різних фаз колінеарні).

У цьому випадку перетікання всіх величин, що зберігаються, через бічну поверхню трубки потоку відсутнє, і необмежено наближаючи перерізи S_1 і S_2

так, що максимальний розмір об'єму $diamV$ спрямовується до нуля, отримуємо:

$$\lim_{diamV \rightarrow 0} \left(\int_{S_1} \rho \vec{v} d\vec{S} + \int_{S_2} \rho \vec{v} d\vec{S} \right) = (\rho \vec{v})_{S_1} \vec{S}_1 + (\rho \vec{v})_{S_2} \vec{S}_2. \quad (2.39)$$

Індекси S_1 і S_2 показують значення $\rho \vec{v}$ на поверхнях S_1 і S_2 . Скориставшись гладкістю функцій $\rho \vec{v}$ і дрібністю $|d\vec{n}|$, отримаємо:

$$(\rho \vec{v})_{S_1} \vec{S}_1 = (\rho \vec{v})_{S_2} \vec{S}_2 = (\rho \vec{v})_{S_1} \vec{S}_1 + [-(\rho \vec{v})_{S_1} \vec{S}_1 + d(\rho \vec{v})_{S_1} \vec{S}_1 + \dots] = d(\rho \vec{v}) \vec{S}.$$

Для доданків виду (2.34) також можна скористатися відповідною інтегральною теоремою (2.19). Зокрема, для того ж об'єму V запишемо:

$$\lim_{diamV \rightarrow 0} \left(- \int_V \beta \nabla p dV \right) = -\beta \vec{S} dp. \quad (2.40)$$

Прирівнюючи праву частину рівняння (2.34) сумі правих частин рівнянь (2.37) і (2.40) і ділячи на $d\tau$, з точністю до членів другого порядку малості маємо:

$$\frac{d(\rho \vec{v} \vec{S})}{d\tau} = -\beta \vec{S} \frac{dp}{d\tau} + \vec{S} \vec{v}_n \sum_{(m)} \psi_m, \quad (2.41)$$

де $\vec{v}_n = \frac{d\vec{n}}{d\tau}$ – швидкість частинок n -ї фази ($n = \overline{1, N}$).

Припустимо, що силами, зумовленими градієнтом тиску, на розрахунковій ділянці можна знехтувати. Про малість градієнта тиску в основній ділянці факелу свідчать численні експерименти з вимірювання тиску в затоплених турбулентних потоках [90-91], характер руху в яких аналогічний характеру руху у факелі [92-93]. В такому випадку закони збереження запишуться у вигляді:

$$\frac{d[\beta \rho(\vec{v} \vec{S})]}{d\tau} = \psi_i(\vec{v} \vec{S}); \quad (2.42)$$

$$\frac{d[\beta \rho \vec{v}_i(\vec{v} \vec{S})]}{d\tau} = \vec{f}_i(\vec{v} \vec{S}). \quad (2.43)$$

В силу раніше прийнятого припущення про відсутність міжфазових переходів рівняння (2.42) набуде вигляду :

$$\beta_n \rho_n (\vec{v} \vec{S}) = \text{const}, \quad n = \overline{1, N+1}. \quad (2.44)$$

Підставивши співвідношення (2.44) в (2.43), отримаємо стандартну форму рівняння руху:

$$\beta_n \rho_n \frac{d\vec{v}_i}{d\tau} = \vec{f}_i. \quad (2.45)$$

Перш ніж перейти до моделювання процесів, що протікають у розпилюванні, необхідно, по-перше, поряд із силами, зумовленими статичним тиском, гравітацією та опором, оцінити внесок інших ефектів і, по-друге, вибрати рівняння для розрахунку коефіцієнта опору.

2.4 Оцінка дії сил, що впливають на формування факела щілинного розпилювача

Ефект приєднаної маси відображає динамічний напір середовища на частку і означає збільшення її розрахункової маси. Вплив приєднаної маси може позначатися лише на ділянці різкого гальмування крапель, тобто в корені факела, де газ практично відсутній.

Цей ефект можна виразити залежністю:

$$\vec{f}_n = \frac{1}{12} \pi d_k^3 \rho_z \frac{d}{d\tau} \vec{v}_{відн}, \quad (2.46)$$

де ρ_z – густина газового середовища, в яке відбувається розпилювання – густина атмосферного повітря; $\vec{v}_{відн}$ – відносна швидкість руху частинки.

Тоді порівняння із силою опору дає : $f_o / f_n \approx 10^3 (\approx 10^5)$, тобто впливом цього ефекту можна знехтувати.

Співвідношення масових сил і сили опору можна представити у вигляді:

$$\frac{f_o}{f_{mn}} = \frac{3C_k \rho_z v_{відн}^2}{2\pi d_k \rho_{pid} g (1 - \rho_z / \rho_{pid})}, \quad (2.47)$$

де ρ_{pid} – густина рідини, що розпилюється.

Оскільки для розпилювання води в повітрі при $v_{відн} \approx 0,1 \text{ м/с}$ і $d_k \approx 0,1 \text{ мм}$, то наведене відношення матиме порядок одиниць, а отже f_o і f_{mn} сумірні між собою.

Сили Бассе-Бусинеска враховують відхилення течії від встановленого напрямку і виражають миттєвий гідродинамічний опір:

$$f_s = \frac{3}{2} d_k^2 (\pi \rho_s \mu_s)^{0,5} \int_{t_0}^t \frac{dv_{відн} / d\tau}{\sqrt{t_0 - t}}, \quad (2.48)$$

де μ_s – кінематична в'язкість зовнішнього середовища.

Показано [92], що для стоксовського режиму течії помилка, яка внесена неврахуванням цих сил, не перевищує 4%. Приєднану масу і сили Бассе необхідно враховувати лише в тому випадку, коли густина суцільної фази того ж порядку, що і густина дисперсних частинок, або перевищує її.

Сили Бернуллі обумовлюються миттєвими різницями швидкостей, пов'язаними з турбулентними пульсаціями. Вони можуть суттєво впливати лише на пульсаційні складові швидкостей частинок, виважених у турбулентному потоці.

Врахування вторинного дроблення крапель та їх коалесценції може в деяких випадках значно підвищити точність розрахунків процесів розпилу.

Оскільки при визначенні дисперсних характеристик розпилювачів відбір проб здійснюється на значній відстані від самого розпилювача, отримані результати (у тому числі і отримані емпіричні рівняння) вже враховують розпад первинних крапель, обумовлений впливом навколишнього газу в безпосередній близькості від місця введення рідини. Якщо перетин розпилювача незмінний, тобто швидкість потоку не змінюється, необхідність врахування вторинного дроблення крапель відпадає.

Найчастіше у розпилювачах коалесценція крапель неспроможна помітно проявитися, оскільки ймовірність їх зіткнення порівняно мала: по-перше, у безпосередній близькості від розпилювача відмінність у швидкостях окремих

крапель дуже незначна; по-друге, при віддаленні від місця вильоту концентрація крапель різко падає, і вже на відстані кількох сантиметрів наближається до нуля. Виняток може бути лише у випадку паралельної роботи кількох розпилювачів. Однак нескладна оцінка дозволяє встановити, що і в цьому випадку помітна кількість зіткнень спостерігається лише при дуже щільній установці пристроїв розпилювання, що застосовується вкрай рідко.

Розрахунок коефіцієнта опору. Точність теоретичного опису динаміки руху потоків значною мірою визначається правильністю вибору рівняння для розрахунку коефіцієнта опору C_k . Так, Хогланд зазначає [94], що помилка на порядок при розрахунку коефіцієнта опору еквівалентна зміні розміру частинок приблизно втричі.

При виведенні розрахункових рівнянь часто ґрунтуються на так званій стандартній кривій опору $C_k = f(Re)$, що отримана в дослідях з обтікання кулі нестискним ізотермічним потоком нескінченної протяжності. Багато відомих рівнянь є апроксимаціями стандартної кривої з різними додатковими членами, що враховують реальні умови.

Розглянемо ці умови. При рівних значеннях числа Re коефіцієнт опору в неусталеному потоці може бути значно вище, ніж в усталеному [95-96].

Прискорення потоку запропоновано [97] враховувати додатковим коефіцієнтом:

$$A_c = \frac{d_k}{(v_e - v_k)^2} \frac{dv_k}{d\tau}. \quad (2.49)$$

Введення даного коефіцієнта компенсує неврахування в рівнянні сумарної щільності сил членів, що викликають прискорення, та перенесення їхньої ролі на силу опору. Так, при суттєво неусталеному характері обтікання частинок критерії Рейнольдса Re і Вебера We не є визначальними критеріями процесу їх прискорення.

Істотний вплив на коефіцієнт опору надає турбулентність потоку, причому у разі високої концентрації частинок вони самі починають виступати як ефективна турбулізаційна решітка. При цьому масштаб турбулентності стає

порівнянним із розміром частинок. Розглядаючи вплив турбулентності, у роботі [94] відзначали зниження C_k зі зростанням числа Re .

При досить високій концентрації частинок (β) області збуреного руху суцільного середовища, що обтікають сусідні частинки, можуть перекриватися. У цьому випадку коефіцієнт опору значно відрізняється від коефіцієнта опору одиночної частки. У роботі [95] граничне значення β орієнтовно прийнято рівним 0,015, а при $\beta < 0,015$ частки розглядаються як поодинокі.

При збільшенні розміру крапель характер їх обтікання помітно відрізняється від характеру обтікання твердих частинок, оскільки, поряд з уже розглянутими, починають проявлятися й інші ефекти (пульсації форми краплі внаслідок рухливості поверхні розділу та нерівномірного розподілу тиску на ній; внутрішня циркуляція рідини; дроблення тощо).

Критичний діаметр крапель $d_{кр}$, що відповідає умовній межі, можна визначити за критеріальним рівнянням, отриманим при дослідженні абсорбції на краплях різних діаметрів [72]:

$$\frac{\sigma}{d_{кр} \gamma_{pid}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \left(\frac{v_{відн} \mu_z}{\sigma} \right)^{0,78} \left(\frac{\sigma^3 \rho_z^2}{\mu_z \gamma_{pid}} \right)^{0,42}, \quad (2.50)$$

де σ – поверхневий натяг краплі; γ_{pid} – об’ємна вага рідини.

Діаметру $d_{кр}$ відповідає критичне значення числа Re , що визначається за рівнянням виду:

$$Re_{кр} = 4,55 \left(\frac{\sigma^3 \rho_z^2}{\mu_z^4 |\rho_{pid} - \rho_z| g} \right). \quad (2.51)$$

Так, наприклад, для води $Re_{кр} = 1000$. При $Re \geq Re_{кр}$ значення C_k зростає.

Пульсації форми Раушенбах пропонує [98] враховувати запровадженням поправочного коефіцієнта. Дуже зручно було б враховувати подібним чином інші чинники, обумовлені рідинною структурою крапель. Однак можливість такого представлення досить складна, оскільки не завжди для будь-якої функції $f(x, y)$ існують такі значення $\varphi(x)$ і $\psi(y)$, для яких $f(x, y) = \varphi(x)\psi(y)$.

Аналіз та кількісне порівняння рівнянь для розрахунку коефіцієнта опору наведено в [99]. Показано, що більшість рівнянь, отриманих у дослідях із краплями, дає близькі результати, що лежать в межах стандартної кривої. При цьому зазначається, що вибір тієї чи іншої залежності має визначатись конкретним режимом течії.

Для випадку, що розглядається, найбільш обґрунтованим слід вважати рівняння Ривкінда і Рискіна [100], яке і використане при складанні моделі гідродинаміки факела.

2.5 Моделювання гідродинаміки факела розпилю

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

Щоб виділити конкретну модель з класу, що описується співвідношеннями (2.44) і (2.45), необхідно задати вирази для розрахунку f_o і f_g та методику переходу від перерізу елементарного струмка S до перерізу факела S_ϕ .

У найбільш загальному випадку сукупність дисперсних частинок, що випромінюються точковим джерелом (розпилювачем), поширюється всередині об'єму викривленого конуса, як показано на (рис. 2.7).

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

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

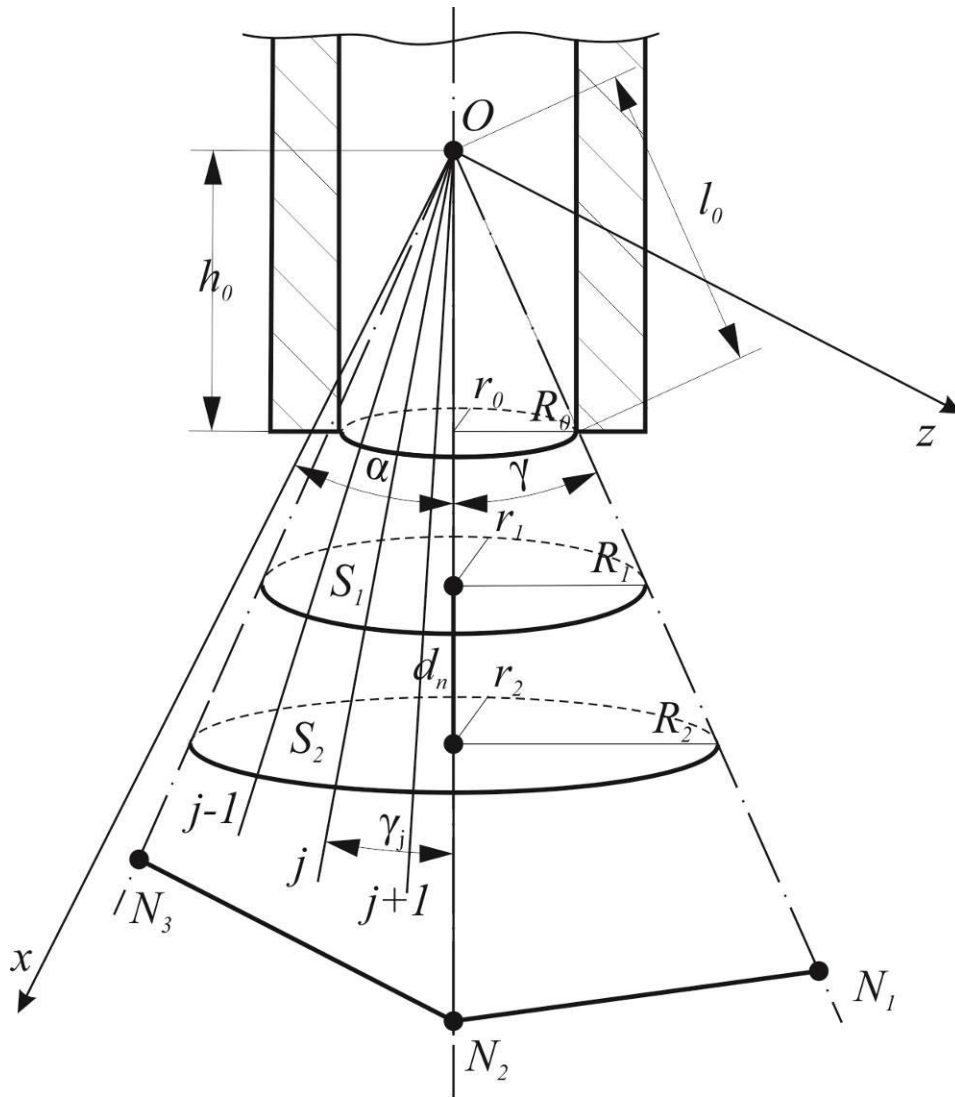


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема вільного факела щілинного розпилювача: визначення габаритів факела; розбивка перерізу факела на струмки потоку

Перетин факела зручно визначити як сукупність точок рідкої фази, що одночасно і з однаковою швидкістю покинули розпилювач. Оскільки, розглядається розпилювання щілинним розпилювачем, то через форму соплового отвору рідина покидає отвір ламінарним потоком з епюрною швидкістю у вигляді еліпсоїда. Для визначення площі перерізу факела введемо полярну систему координат, центр якої розташуємо на центральному елементарному струмку (рис. 2.8).

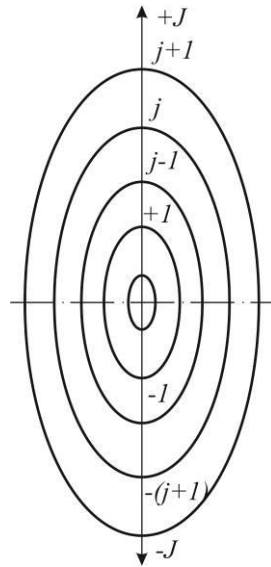


Рисунок 2.8 – До визначення площі поперечного перерізу факела

Розіб'ємо криволінійний сектор на k частин такими променями $\varphi = \varphi_1$, $\varphi = \varphi_2$, ..., що $\alpha = \varphi_0 < \varphi_1 < \varphi_2 < \dots < \varphi_{k-1} < \varphi_k = \beta$, і $\xi = \max_{i=1,k}(\varphi_i - \varphi_{i-1}) \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$.

В силу властивостей площі фігури, площа вихідного криволінійного сектору $S(G)$ представиться сумою площ криволінійних секторів $S(G_i)$ на кожній ділянці розбиття $S(G) = \sum_{i=1}^k S(G_i)$.

Вважаючи форму факелу подібною до форми соплового отвору з достатньою для практики точністю, вважаємо коефіцієнт гомотетії

$$\zeta = \frac{l_0 + l}{l_0} = 1 + \frac{l}{l_0}; \frac{R_{(l+l_0)}}{R_0} = \frac{l_0 + l}{l_0}; \quad ; r(S) = r_0 \cdot \zeta \cdot (l + l_0).$$

$$R(S) = R_0 \cdot \zeta \cdot (l + l_0); r(S) = r_0 \cdot \zeta \cdot (l + l_0).$$

Нехай $R_{\min_i}, r_{\min_i}$ і $R_{\max_i}, r_{\max_i}$ – найменше та найбільше значення функцій піввісей еліпса $R(\varphi) = \chi(\varphi)$ та $r(\varphi)$ на i -му відрізьку $[\varphi_{i-1}; \varphi_i]$. На кожному такому відрізьку збудуємо по два еліптичних сектори P_i і Q_i з великою та малою піввісьями еліпса $R(\varphi) = \chi(\varphi)$; $r(\varphi) = R(\varphi) \cdot \frac{r_0}{R_0} = \chi(\varphi) \cdot \frac{r_0}{R_0}$, пропорційними до вихідного отвору, відповідно.

Позначимо P і Q фігури, які є об'єднанням секторів P_i , $i = \overline{1, k}$ і Q_i , $i = \overline{1, k}$ відповідно.

Їхні площі будуть дорівнювати:

$$S(P) = \sum_{i=1}^k S(P_i) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} (R_{\min_i} \cdot r_{\min_i}) \cdot (\varphi_i - \varphi_{i-1}), \quad (2.52)$$

$$S(Q) = \sum_{i=1}^k S(Q_i) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} (R_{\max_i} \cdot r_{\max_i}) \cdot (\varphi_i - \varphi_{i-1}), \quad (2.53)$$

Причому $S(P) \leq S(G) \leq S(Q)$.

Оскільки функція $\delta = \chi(\varphi)$ безперервна на відрізку $[\alpha; \beta]$, то на цьому відрізку буде також безперервна функція $\frac{1}{2} \chi^2(\varphi)$. Для цієї функції $S(P)$ і $S(Q)$ можна розглядати аналогічно, нижній та верхній, сумам Дарбу, що призводить до рівності виду:

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} S(P) = \lim_{\xi \rightarrow 0} S(Q) = S(G). \quad (2.54)$$

Таким чином після перетворень, площа криволінійного сектору (площа поперечного перетину факелу) знаходиться за формулою:

$$\begin{aligned} S(G) &= \lim_{\xi \rightarrow 0} \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} (R_{\min_i} \cdot r_{\min_i}) (\varphi_i - \varphi_{i-1}) = \\ &= \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0}{R_0} \cdot \chi^2(\varphi) d\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_0}{R_0} \cdot \int_{\alpha}^{\beta} \chi^2(\varphi) d\varphi. \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$r_{\min_i} = R_{\min_i} \cdot \frac{r_0}{R_0}; \quad r_{\max_i} = R_{\max_i} \cdot \frac{r_0}{R_0}.$$

Відповідний скалярний добуток $\vec{S} \vec{v}$ представляємо як $S v_{pid2}$ (де v_{pid2} – проекція швидкості рідкої фази центрального струмка на напрям руху рідини). Об'ємна щільність масової сили, що діє на рідку фазу $\vec{f}_g$, дорівнює $\beta(\rho_{pid} - \rho_z) \vec{g}$, а сила опору відносного руху фаз – $\vec{f}_o$; для її розрахунку можна використовувати рівняння виду (2.36). Тоді при рівномірному розподілі рідини по перерізу з рівняння (2.45) для довільного моменту часу отримуємо:

$$\beta = \frac{G_{pi\partial}}{vS}, \quad (2.56)$$

де $G_{pi\partial}$ – витрата рідини.

Вираз (2.45) у записі для дисперсної фази має вигляд:

$$\frac{dv_{pi\partial}}{d\tau} = \frac{1}{\beta\rho_{pi\partial}}(\vec{f}_g - \vec{f}_o). \quad (2.57)$$

Введемо позначення для кожного j струмка потоку проекції імпульсу газової фази на i -ту вісь координат ($i \in x, z$), тобто, проекції вектору, що стоїть під знаком диференціала в рівнянні (2.45), записаному для газової фази:

$$\varepsilon\rho_z v_{zij} v_{zj} S = G_{zij}. \quad (2.58)$$

Оскільки величини G_{zij} відомі (спочатку з початкових умов, потім – в результаті попереднього кроку обчислень), то легко знайти швидкості газу для будь-якого зі струмків:

$$(\varepsilon\rho_z v_{xj} v_{xj} S)^2 + (\varepsilon\rho_z v_{zj} v_{zj} S)^2 = G_{xj}^2 + G_{zj}^2, \quad (2.59)$$

Звідки:

$$v_{ej} = \sqrt{\sqrt{G_{xj}^2 + G_{zj}^2} \frac{1}{\varepsilon\rho_z S}}. \quad (2.60)$$

Для кожного j -го струмка знаходимо значення проекції v_{xj} і v_{zj} :

$$v_{xj} = \frac{G_{xj}}{\varepsilon\rho S v_{zj}}, \quad (2.61)$$

$$v_{zj} = \frac{G_{zj}}{\varepsilon\rho S v_{xj}}. \quad (2.62)$$

Щоб обчислити коефіцієнт опору, знаходимо модуль відносної швидкості кожного з j струмків:

$$\begin{aligned} v_{0xj} &= v_{pi\partial xj} - v_{xj}; \\ v_{0zj} &= v_{pi\partial zj} - v_{zj}; \\ v_{0j} &= \sqrt{v_{0xj}^2 + v_{0zj}^2}. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Далі підраховуємо коефіцієнт опору та об'ємні щільності сил, що діють на фази:

$$f_{oxj} = f_{cj} \cos(v_{pi\partial xj} \wedge v_{pi\partial j}) = f_{oj} \frac{v_{0xj}}{v_{0j}}; \quad (2.64)$$

$$f_{pi\partial xj} = -f_{oxj}; \quad (2.65)$$

$$f_{pi\partial zj} = -f_{ozj} + f_g; \quad (2.66)$$

$$f_{zij} = f_{oj}. \quad (2.67)$$

Рівняння збереження кількості руху для газової фази має вигляд:

$$\frac{dG_{zij}}{d\tau} = f_{oj}. \quad (2.68)$$

Інтегруючи шість рівнянь (2.68), записаних для двох проекцій кожного з трьох струмків, отримаємо значення G_{zij} для наступного кроку обчислень.

Щоб визначити швидкості рідкої фази, записуємо рівняння (2.57) для кожної проекції:

$$\frac{dv_{pi\partial xj}}{d\tau} = -\frac{f_{oxj}}{\beta\rho_{pi\partial}}; \quad (2.69)$$

$$\frac{dv_{pi\partial zj}}{d\tau} = \frac{-f_{ozj} - f_g}{\beta\rho_{pi\partial}}. \quad (2.70)$$

Зрештою, за відомими проекціями швидкостей рідини інтегруванням рівнянь

$$\frac{dx_j}{d\tau} = v_{pi\partial xj}; \quad (2.71)$$

$$\frac{dz_j}{d\tau} = v_{pi\partial zj}, \quad (2.72)$$

знаходимо координати точок траєкторій усіх струмків.

Таким чином, рівняння (2.55), (2.57), (2.59) – (2.70) представляють модель динаміки дисперсної системи в даному випадку.

Початкові умови для розрахунку за отриманою системою рівнянь наступні:

1. При $\tau = 0$ рідка фаза залишає розпилювач.
2. $\beta(0) = 1$, $\varepsilon(0) = 0$; отже, за будь-якого прийнятого значення $v_{zj}(0)$, $q_{zj}(0) = 0$.

3. Вершина кореневого кута факелу розміщена на початку координат. Тоді початкові координати кожного зі струмків визначаються співвідношеннями виду

$$\begin{aligned} x_j(0) &= l_0 \cos(\alpha' + \theta_j \gamma); \\ z_j(0) &= l_0 \sin(\alpha' + \theta_j \gamma), \end{aligned} \quad (2.73)$$

де

$$\theta_j = \begin{cases} -1 & \text{при } j = 1 \\ 0 & \text{при } j = 2, \\ 1 & \text{при } j = 3 \end{cases} \quad (2.74)$$

де α' – кут між віссю x і віссю розпилювача; γ – половина кореневого кута факелу; l_0 – відстань від «вершини» факелу до поверхні, за межами якої суцільний потік починає диспергуватися.

За l_0 приймаємо довжину утворюючої конуса, вписаного в сопловий канал, з вершиною, що збігається з вершиною факела; розраховуємо її за формулою виду:

$$l_0 = \frac{R_0}{\sin \gamma}, \quad (2.75)$$

де R_0 – більший радіус еліпсу соплового отвору розпилювача.

При розв'язанні рівнянь руху суцільної фази (при $\tau = 0$) числове інтегрування необхідно проводити з деякого часу τ_1 , що зумовлює початок розпаду потоку:

$$\tau_1 = \frac{l_1 - l_0}{v_{pi0}(0)}. \quad (2.76)$$

Це потребує відповідного коригування початкових умов.

Швидкість рідини до моменту τ_1 вважаємо незмінною. Відстань $l = l_1 - l_0$ вибираємо з умови існування факелу, що складається з крапель рідини і відповідного щільного укладання куль, тобто $\beta = 0,4$. Тут:

$$\beta(l) = \frac{v_{pi0}(0) / f}{v_{pi0}(0) / S(l)}; \quad (2.77)$$

$$S(l) = 2\pi R^2 \cdot \frac{r_0}{R_0} \cdot \sin^2 \frac{\gamma}{2}; \quad (2.78)$$

$$2R = 2 \left(l + \frac{R_0}{\sin \gamma} \right). \quad (2.79)$$

Тоді

$$\beta(l) = \frac{1}{2 \left(\frac{l}{l_0} + \frac{S}{\sin \gamma} \right)^2 (1 - \cos \gamma)}; \quad (2.80)$$

$$\beta(0) = \frac{\sin^2 \gamma}{2(1 - \cos \gamma)}. \quad (2.81)$$

Зі співвідношення $\beta = \frac{\beta(l)}{\beta(0)}$ отримуємо:

$$l = \frac{R_0}{\sin \gamma} \left(\sqrt{\frac{1}{\beta}} - 1 \right). \quad (2.82)$$

Тоді

$$l_1 = l_0 + l = \frac{R_0}{\sin \gamma} \sqrt{\frac{1}{\beta}}. \quad (2.83)$$

$$\text{Для } \beta = 0,4 \quad l_1 = \frac{0,79 \cdot 2R_0}{\sin \gamma}.$$

Витрата рідини визначається за початковою швидкістю:

$$G_{pi0} = \pi R_0 \cdot r_0 \cdot v_{pi00}. \quad (2.84)$$

На зрізі сопла площа живого перерізу потоку dS більша, ніж площа нормального перерізу сопла; у цьому випадку v_{pi0} на межі розпилювання має бути менше v_{pi00} , а саме:

$$v_{pi\partial}(l) = v_{pi\partial}(0) \frac{\sin^2 \gamma}{2(1 - \cos \gamma)}. \quad (2.85)$$

Таким чином

$$v_{pi\partial}(l) = \frac{(1 + \cos \gamma)v_{pi\partial}(0)}{2}. \quad (2.86)$$

Швидкість газу можна розрахувати в такий спосіб. Потік імпульсу газу $q_z = \varepsilon \rho v_z^2 S$ через переріз факелу S в околиці точки $l=0$ запишемо у вигляді:

$$q(l) = q(0) + q'(0)l + \frac{q''(0)}{2!}l^2 + \dots \quad (2.87)$$

Відкидаючи внаслідок лінійності $q(l)$ члени порядку вище за перший і враховуючи, що $q(0) = 0$, отримаємо:

$$\varepsilon \rho_z v_z^2 S = q'(0)l. \quad (2.88)$$

Замінюючи ε на $1 - G / [\rho_{pi\partial} v_{pi\partial}(0) S]$, та вважаючи швидкість рідини незмінною на відрізку l і враховуючи, що на малих відстанях від розпилювача площа перерізу факела пропорційна квадрату відстані до вершини, з залежності (2.84) отримаємо:

$$v_{pi\partial}(l) = \sqrt{\frac{k}{l + 2l_0}}. \quad (2.89)$$

Константу k знайдемо з умови:

$$\lim_{l \rightarrow 0} v_{pi\partial} = v_{pi\partial}(0). \quad (2.90)$$

Тоді

$$v_z(l) = v_{pi\partial}(0) \sqrt{\frac{2R_0}{2R_0 + l \sin \gamma}}. \quad (2.91)$$

Інші початкові умови – діаметр крапель, їх початкову швидкість $v_{pi\partial}(0)$, коефіцієнт витрати, кореневий кут факела – розраховуємо за емпіричними рівняннями для обраного розпилювача.

2.6 Імітаційне моделювання розподілу робочої рідини в об'ємі факелу розпилювання щілинного розпилювача

Аналіз джерел інформації у першому розділі дозволяє стверджувати, що імітаційне моделювання роботи щілинного розпилювача доцільно проводити з використанням методу кінцевих об'ємів CFD. При використанні CFD-моделювання було порівняно сітчасті та фізичні моделі. Найкращі результати були отримані шляхом порівняння кута розпилення із зазначеним (виробником) кутом розпилення досліджуваного розпилювача. Для розрахунку кута розпилення використовувалося рівняння:

$$\theta_s = 2 \tan \left(\frac{x_s}{h} \right). \quad (2.92)$$

Геометрію розпилювача щілинного розпилювача було створено за допомогою CAD Solidworks. На етапі створення геометрії виникла проблема визначення фактичних розмірів внутрішніх каналів розпилювача та розмірів соплового отвору, оскільки у довідковій літературі фірми виробники не надають відповідної інформації. Тому для відтворення геометрії розпилювача визначення необхідних розмірів було проведено з використанням лупи Бринеля (рис. 2.9).

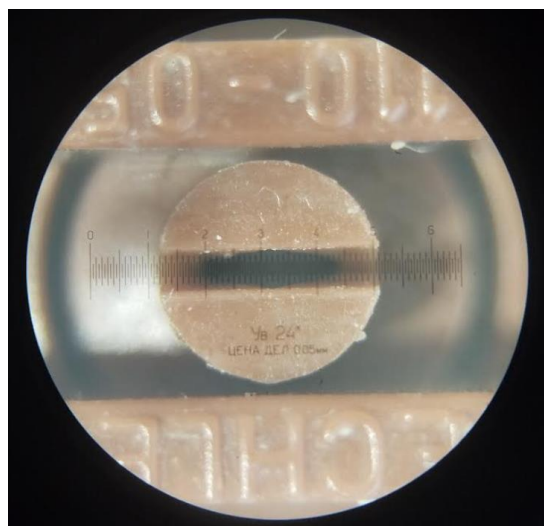


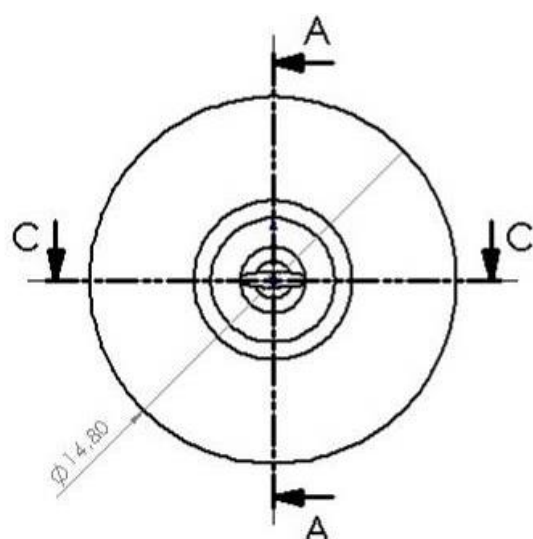
Рисунок 2.9 – Визначення розмірів внутрішніх каналів розпилювача при створенні геометрії розпилювача

При подальшому імпорті CAD моделі у ANSYS CFD-геометрію рідини було розбито на різні області. Крім того, сопло було розбито на кілька областей для однієї з поліедричних сіток та тетраедричної сітки. Це дозволило краще контролювати розмір комірок сітки навколо сопла.

Було розроблено кілька різних сіток для дослідження впливу розміру сітки та типу комірок. Для вивчення впливу розміру сітки використовувалися груба та дрібна сітка. Груба сітка містила приблизно 400 тисяч комірок, тоді як дрібна сітка містила приблизно 1,6 мільйонів комірок. Також було порівняно три різні типи комірок.

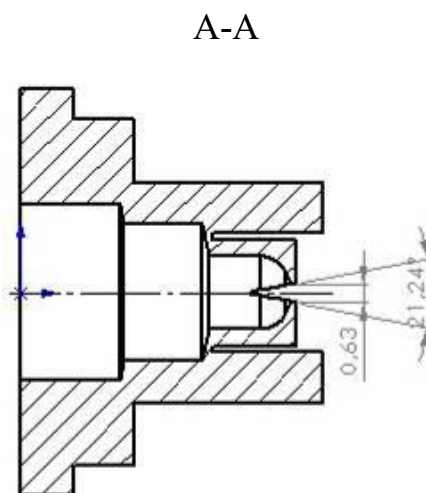
Це були обрізана комірка, поліедрична комірка та тетраедрична комірка. Модель обрізаної сітки комірок в основному складається з гексаедричної комірки, але допускає деякі тетраедричні комірки. Модель поліедричної сітки комірок використовує поліедричні комірки, а модель тетраедричної сітки комірок використовує тетраедричні комірки. Розбиваючи сопло на кілька областей, можна було використовувати менший базовий розмір для сітки, зберігаючи при цьому подібну кількість комірок.

Отриману геометрію розпилювача наведено на (рис. 2.10). Це також було зроблено для тетраедричної сітки. Було проведено дослідження впливу розміру комірок сітки, типу комірок сітки та моделювання турбулентності. Під час цих симуляцій було змінено одну змінну, таку як розмір комірок, і симуляцію порівнювали з базовим випадком. При дослідженні розміру комірок сітки результати свідчать про те, що розмір комірок сітки має значний вплив на результати симуляції. Загалом, коли використовуються більші розміри комірок, кут розпилення ширший. Ширший кут розпилення, ймовірно, пов'язаний з методом об'єму рідини, який використовується для симуляцій. Як обговорювалося раніше, метод об'єму рідини відстежує межу розділу між фазами. Більший розмір комірок матиме набагато важче відстежувати межу розділу, ніж менший розмір комірок, що спричиняє ширший кут. Було визначено, що обрізана сітка комірок показала найкращі результати під час дослідження різних типів сіток.

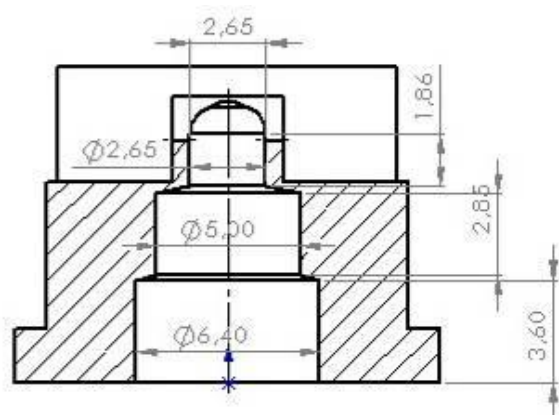


а)

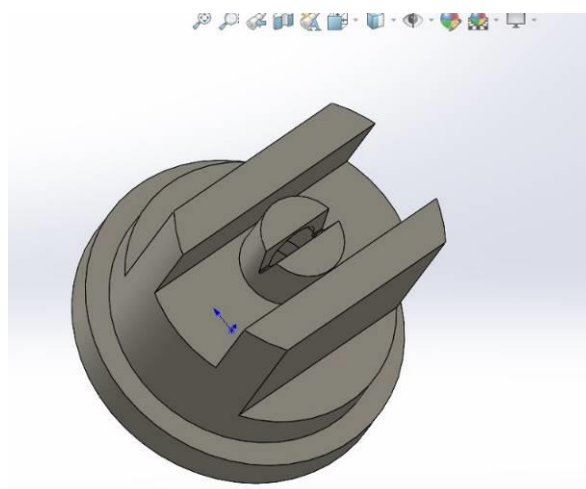
C-C



б)



в)



г)

Рисунок 2.10 – Геометрія розпилювача: а – вид згори; б, в – види з боку;
г – 3D-модель

Іншими типами комірок, що використовувалися, були тетраедричні та поліедричні типи комірок. Хоча поліедрична сітка комірок забезпечувала кут розпилення, ближчий до зазначеного значення сопла, обрізана сітка комірок забезпечувала краще представлення шлейфу розпилення. Краща продуктивність моделі сітки з усіченими комірками зумовлена розміром комірок, що використовується в сітці. При збереженні тієї ж кількості комірок у сітці розмір комірок сітки з усіченими комірками значно менший, що призводить до кращого представлення розпиленого шлейфу. Знову ж таки, це

показує важливість розміру комірок під час моделювання розпилювачів. Моделювання в нестационарному часі показало кращі результати, ніж моделювання в усталеному часі. Найімовірніше, це пов'язано з тим, що сітка враховує нестационарність розпаду рідини під час процесу розпилення. Це підтверджується тим фактом, що коли під час моделювання в стаціонарному режимі використовується дрібніша сітка, результати погіршуються. Дрібніша сітка більше враховує нестационарність моделювання, що суттєво впливає на результати. Моделювання турбулентності мало найменш значущі результати при моделюванні розпилювачів. Розмір крапель було змодельовано за допомогою розподілу Розіна-Раммлера. Для подальшого дослідження було обрано сітку з урізаними комірками, вони були змодельовані як нестационарні зі зменшенням розміру комірок навколо сопла.

Під час вивчення картини розпилення було створено нову геометрію, яка обмежує розмір домену та дозволяє досліджувати зрізи факелу розпилу на відстані 50 см нижче сопла. Для кращого порівняння з експериментальними результатами форму домену було змінено на прямокутну (рис. 2.11).

Представлені на (рис. 2.11) розміри були обрані на підставі серії попередніх експериментальних досліджень, де було виявлено, що при встановленні розпилювача на відстані у 50 см до поверхні обробітку понад 95 % робочої рідини потрапляє на прямокутну площадку 550x550 мм. Тому для спрощення імітаційного моделювання було обрано відповідні розміри домену, при цьому стінки домену завдані такими, що робоча рідина може вільно проходити за межі визначеної області розрахунку, тобто враховані реальні умови на полі.

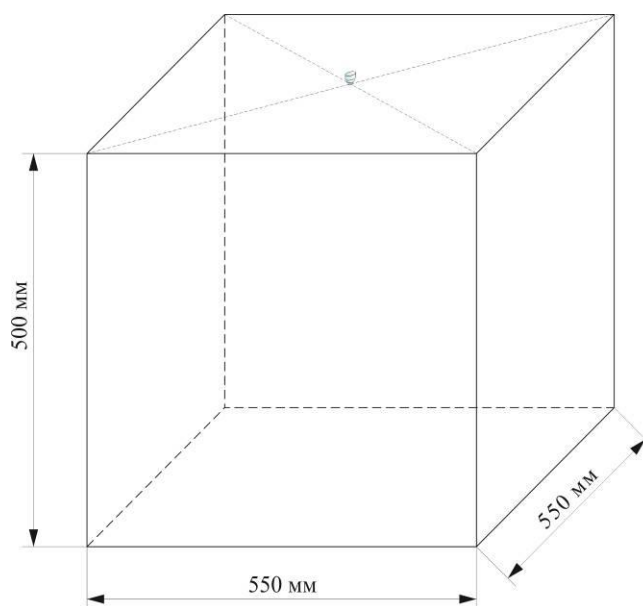


Рисунок 2.11 – Розміри домену для дослідження зрізу факелу розпилення на відстані 50 см нижче сопла

Подібно до симуляцій, що досліджують розподіл розпилення, геометрію також було змінено для симуляцій, що досліджують розбиття струменя рідини в процесі розпилення. Представлення повітря навколо сопла також було видалено. Це було зроблено для зменшення розміру сітки.

Потік рідини описується за допомогою рівняння Нав'є-Стокса. Закон збереження маси, збереження імпульсу та збереження енергії представлені у рівняннях (2.93), (2.94) та (2.95) (збереження маси, імпульсу та енергії відповідно) [101]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0. \quad (2.93)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \otimes v) = \nabla \sigma + f_b. \quad (2.94)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\rho E v) = f_b v + \nabla(v \sigma) - \nabla q + S_E. \quad (2.95)$$

Процес розпилення вважається багатофазною проблемою, тобто присутні кілька фаз, у цьому випадку повітря та вода. Це вимагає включення багатофазного моделювання до симуляцій. Існує кілька різних методів

багатофазного моделювання. Одним з найстаріших і найпопулярніших методів є метод об'єму рідини. Об'єм рідини – це метод визначення межі розділу, який намагається передбачити розподіл і рух межі розділу між різними фазами. Метод об'єму рідини визначає розподіл рідини, визначаючи об'ємну частку фази в комірці. Рівняння (2.96) – це рівняння для фази i в конкретній комірці та має задовольняти рівняння (2.97).

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V}. \quad (2.96)$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1. \quad (2.97)$$

Фази, присутні в конкретній комірці, можна визначити з об'ємної частки кожної фази. Якщо об'ємна частка фази i дорівнює нулю, то конкретна комірка не містить фази i . Якщо об'ємна частка фази i дорівнює одиниці, то конкретна комірка заповнена фазою i . Якщо об'ємна частка знаходиться між 0 та 1, межа розділу між фазами присутня всередині комірки [101-102].

Метод об'єму рідини відстежує об'ємну частку кожної фази, присутньої в симуляції. Це дозволяє припустити, що об'ємну частку можна використовувати для візуалізації розпиленого шлейфу. Однак такий підхід вимагає великих ресурсів для обчислення, оскільки розмір комірки має бути достатньо малим для досягнення необхідної точності імітаційного моделювання [103].

Альтернативою, яка потребує меншого обсягу обчислювальних ресурсів, ніж перегляд розпиленого шлейфу з об'ємною часткою, є використання пасивного скаляра. Пасивний скаляр подібний до використання барвника. Пасивний скаляр є «пасивним», оскільки додавання пасивного скаляра не впливає на фізичні властивості симуляції. Рівняння переносу для пасивного скалярного компонента задається рівнянням [102]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi_i dV + \oint_A \rho \phi_i \mathbf{v} \cdot d\mathbf{\alpha} = \oint_A \mathbf{j}_i \cdot d\mathbf{\alpha} + \int_V S \phi_i dV. \quad (2.98)$$

Важливою умовою стійкості, яка буде діяти через використання дрібної сітки під час моделювання розриву струменя рідини, є умова Куранта-Фрідрікса-Леві або умова CFL:

$$C = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1. \quad (2.99)$$

де C – число Куранта.

Умова CFL диктує, що зі зменшенням розміру комірки, яка використовується для моделювання, крок за часом також повинен зменшуватися, інакше моделювання стане нестабільним [104].

При модулюванні, як зазначалося вище, використовувалася сітка з урізаними комірками, і вони були змодельовані як нестационарні, з увімкненою гравітацією та k -моделюванням турбулентності. Першим отриманим результатом була об'ємна частка води в повітрі. Візуалізація всього розпиленого шлейфу за допомогою об'ємної частки є обчислювально ресурсоємною через малий розмір комірок. Набагато менш обчислювально ресурсоємним рішенням для візуалізації розпиленого шлейфу є використання пасивного скаляра. Використання сітки з меншою кількістю комірок призводить до ширшого кута розпилення порівняно з сіткою з малими комірками. Це, ймовірно, пов'язано з більшим розміром комірок сітки. Загалом, моделювання, які використовують більший розмір комірок, призводять до ширшого кута розпилення. Одним з можливих пояснень цього є те, що більший розмір комірок неадекватно відображає межу розділу між двома фазами. Це призводить до того, що більша частина пасивного скаляра розподіляється по всій комірці. Тому можна стверджувати, що для наближення до реального процесу розпилу необхідним є використання дрібної сітки з меншими розмірами комірок, відповідно, дозволяє точніше обчислювати межу між двома фазами, що забезпечує краще представлення розпиленого шлейфу.

Основним завданням імітаційного моделювання є визначення взаємозв'язку між зміною геометрії соплового отвору розпилювача та характером розподілу робочої рідини по поверхні обробітку. З аналізу отриманої 3D-моделі розпилювача (рис. 2.10), можна дійти висновку, що розміри соплового отвору при зношенні суттєво змінюються у центральній області розпилювача. Тобто, якщо взяти до уваги, що для такого типу

розпилювачів визначальними розмірами є довжина (b) та ширина (a) соплового отвору (рис. 2.12), розмір b формується діаметром внутрішнього циліндричного каналу і під час експлуатації суттєво не змінюється. Натомість розмір a сформований клином з певним кутом, який розрізає циліндр розпилювача, як наслідок, на бокових поверхнях по центру соплового отвору матеріал має найменшу товщину і схильний до максимально швидкого зношення.

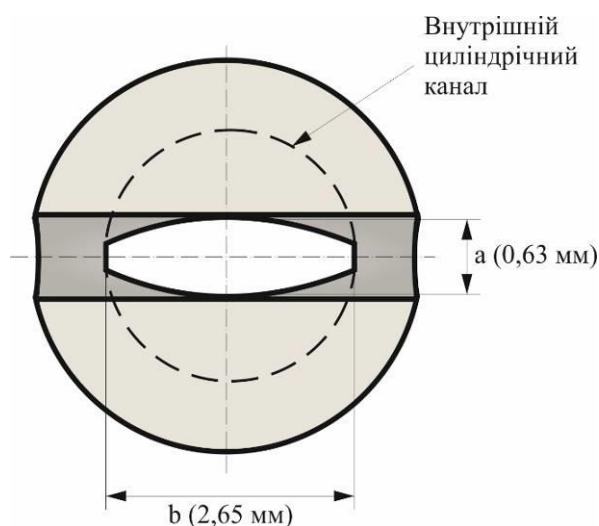


Рисунок 2.12 – Сопловий отвір щілинного розпилювача

Наведені вище припущення щодо максимальної зміни лінійного розміру a у реальній експлуатації підтверджуються на підставі аналізу зміни геометрії соплових отворів серії розпилювачів, які мають різне напрацювання у мотогодинах. На підставі наведеного, задачу імітаційного моделювання можна спростити до виявлення взаємозв'язку між зміною розміру a та характером розподілу робочої рідини по поверхні обробітку.

Для вирішення поставленої задачі було створено геометрію чотирьох розпилювачів з наступними лінійними розмірами соплового отвору (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Лінійні розміри геометрії соплових отворів розпилювачів з імітацією різного ступеню зношення

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

Проведене моделювання характеру розподілу рідини у факелі розпилення для геометрій 1-4 наведені на (рис. 2.13).

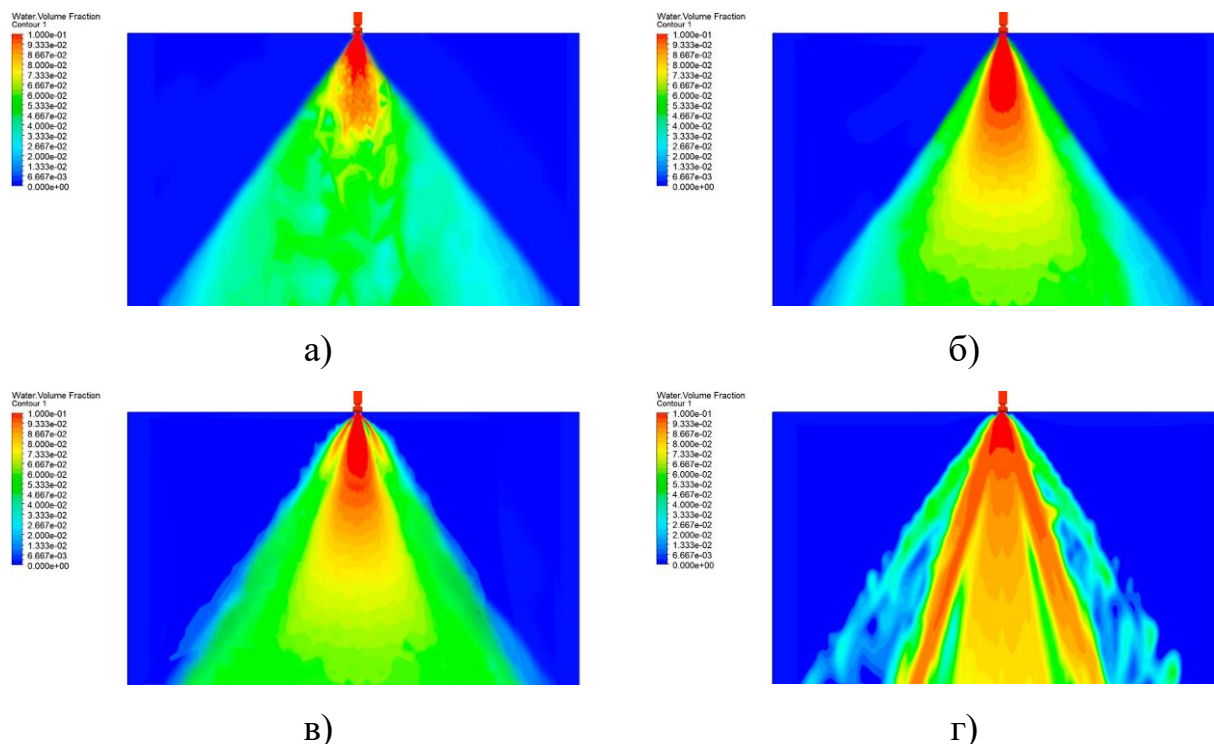


Рисунок 2.13 – Імітаційне моделювання розпилення робочої рідини щілинними розпилювачами при зміні лінійного розміру (а) соплового отвору:

а) 0,63 мм; б) 0,67 мм; в) 0,71 мм; г) 0,75 мм

Аналіз отриманих результатів показує, що при збільшенні лінійного розміру відстежується зміна характеру розподілу робочої рідини у середній факелу у бік збільшення нерівномірності. Так, збільшення соплового отвору у центральній частині призводить до фрагментації факелу, і його розділення на три струмені, які починають спостерігатися на (рис. 2.5), б при зміні розміру (а) лише на 6 %, при його подальшому збільшенні (рис. 2.5 в, г) на бувають чітких меж. Імітаційне моделювання за наведеною вище методикою дає можливість зробити певні висновки щодо нерівномірності розподілення рідини по поверхні обробітку, але для співставлення результатів моделювання та результатів досліджень необхідно привести результати моделювання до кількісної оцінки розподілу рідини.

При збільшенні ширини соплового отвору на поверхні обробітку починають формуватися осередки концентрації робочої рідини, які характеризують збільшення нерівномірності її розподілу. При цьому подрібнення сітки призводить до суттєвого підвищення витрати обчислювальних ресурсів, оскільки, сітка має бути достатньо тонкою, щоб захопити межу між краплею та повітрям, тому є певні обмеження по точності обчислення. Додатково, сітка з великою кількістю комірок, через підвищені вимоги до ресурсу, може обмежувати розмір обчислювальної області, що не дозволяє обчислювати розподіл рідини на великій відстані від осередку розпилення. Ще одна проблема, яка виникає, пов'язана з числом Куранта. Зі зменшенням розміру комірок, крок за часом, який використовується для моделювання, також має бути зменшений. Необхідність зменшення кроку за часом також може призвести до того, що моделювання стане ресурсовитратним. Тому в даному дослідженні через обмеженість обчислювальних ресурсів та часу проведенні імітаційного моделювання використано більш укрупнену сітку, що звичайно впливає на точність кількісної оцінки, але дозволяє проаналізувати тенденції зміни розподілу рідини по поверхні обробітку.

Результати імітаційного моделювання розподілу рідини вздовж осі O_x , при зміні лінійного розміру (a) соплового отвору наведені ведені на (рис. 2.14).

Використовуючи методику суміщення сусідніх розпилювачів, наведену у підрозділі 2.1 (рис. 2.5), (рис. 2.6), розраховуємо значення коефіцієнту варіації CV для сумарного розподілу рідини по поверхні обробітку (рис. 2.15).

З (рис. 2.15) бачимо, що зміни CV та розміру соплового отвору (a) пов'язані параболічною залежністю для якої рівняння кривої матиме вигляд:

$$CV = 1511,3 \cdot a^2 - 1930,2 \cdot a + 622,14 \quad (2.100)$$

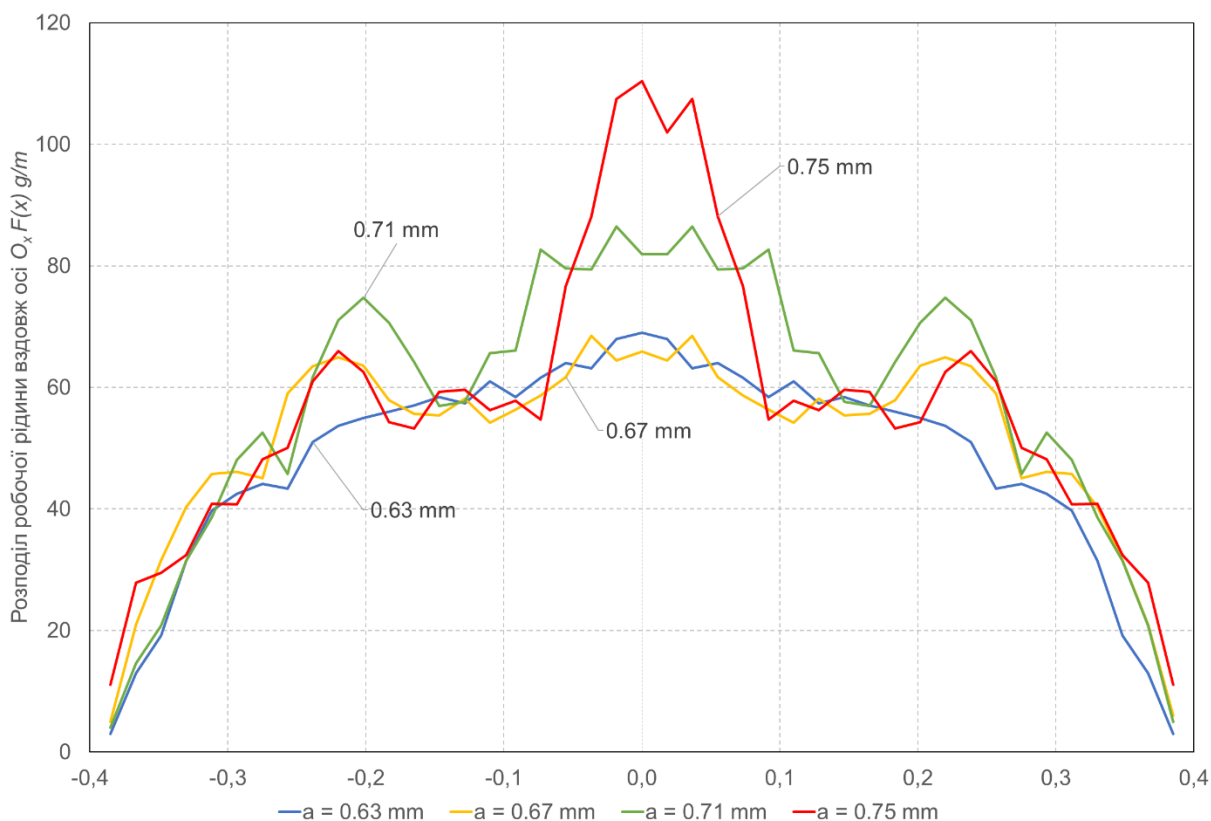


Рисунок 2.14 – Розподіл робочої рідини вздовж осі O_x при зміні лінійного розміру (a) соплового отвору

Якщо на (рис. 2.15) накреслити пряму, що відповідатиме граничному значенню коефіцієнту варіації $CV = 15\%$, то при перетині нею оговорену залежність в точці O буде визначено максимальне значення $a_{max} = 0,716$ мм, при якому зберігається працездатність розпилювача за параметром CV . Перпендикуляр, опущений на вісь, ординат дозволить окреслити область працездатного стану OP розпилювача, в межах якої зміни a не матимуть суттєвого впливу на якість виконання операції захисту рослин. Натомість вихід за її межі характеризуватиме параметричну відмову і необхідність заміни розпилювача.

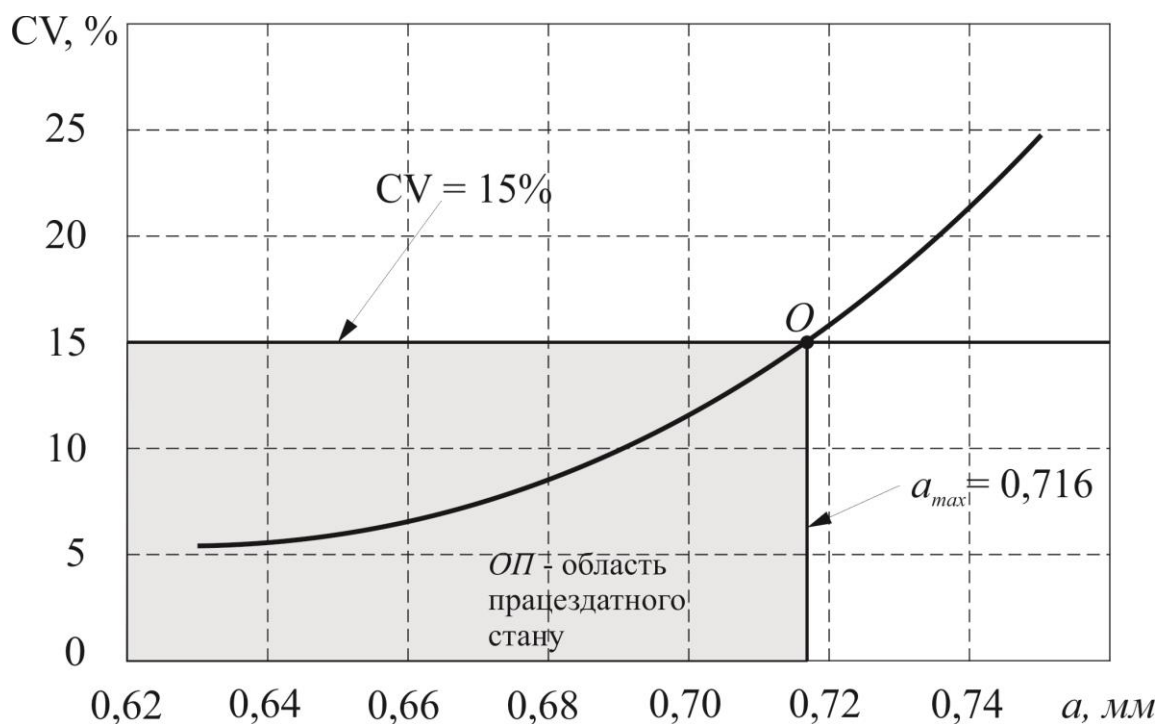


Рисунок 2.15 – Залежність зміни коефіцієнта варіації CV розподілу рідини по поверхні обробітку від зміни ширини соплового отвору (a) розпилювача

Результати імітаційного моделювання витрати рідини G_{pid} та коефіцієнту варіації CV наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати імітаційного моделювання витрати рідини

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

З аналізу отриманих даних видно необхідність контролю саме зміни геометрії розпилювача додатково вказує той факт, що загальна витрата робочої рідини G_{pid} для геометрії 1-4 залишилась майже незмінною, її збільшення не перебільшило 3 %. Тобто, як діагностичний параметр для оцінки працездатності розпилювача, її використання не доцільне.

Повертаючись до висновку щодо методу імітаційного моделювання можна зазначити, що обчислювальна гідродинаміка CFD може бути використана для

моделювання розпаду струменя рідини, але точність результатів залежить від доступних обчислювальних ресурсів. Це моделювання також підтримує використання пасивного скаляра для моделювання розпиленого шлейфу. Хоча пасивний скаляр не фіксує краплі, його можна використовувати для фіксації загальної форми та розподілу в межах розпиленого шлейфу. Даним дослідженням виявлено, що використання обчислювальної гідродинаміки не дозволяє суттєво скоротити час дослідження у порівнянні з експериментом, з огляду на необхідність створення геометрії та обмеженні обчислювальні ресурси, він є майже рівним. При цьому підвищення точності обчислення потребує суттєвого збільшення ресурсів.

2.7 Висновки по розділу

1. Виявлено, що зміна геометрії соплового отвору розпилювача викликає зміну кількості виливу рідини та її розподіл у середні плями розпилю. Гістограма розподілу рідини вздовж осі O_x дозволяє розрахувати коефіцієнт варіації, який характеризує працездатність розпилювача. При розрахунку коефіцієнту варіації необхідно врахувати перекриття між сусідніми розпилювачами, оскільки наявний суттєвий вплив на рівномірність розподілу рідини по поверхні обробітку.

2. Обґрунтовано аналітичну модель гідродинаміки факелу розпилю щілинного розпилювача, яка дозволяє встановити взаємозв'язок між формою соплового отвору розпилювача та характером розподілу робочої рідини по поверхні обробітку з врахуванням діаметру крапель, їх початкової швидкості $v_{pid}(0)$, коефіцієнту витрати та кореневого кута факелу.

3. Імітаційне моделювання роботи щілинного розпилювача при зміні геометрії соплового отвору розпилювача проведено з використанням методу кінцевих об'ємів обчислювальної гідродинаміки CFD, для чого була створена геометрія з врахуванням внутрішніх розмірів каналів розпилювача,

обґрунтована модель сітки, розподіл діаметрів крапель та визначені характеристики домену області, що обчислюється.

4. За результатами імітаційного моделювання визначений взаємозв'язок між характером розподілу рідини по поверхні обробітку, який приведено до осі O_{xy} , що дозволяє визначити коефіцієнт варіації CV та обґрунтована область працездатного стану розпилювача, межі якої задаються коефіцієнтом варіації $CV = 15 \%$ та граничним розміром соплового отвору розпилювача по ширині $a_{max} = 0,716$ мм. При цьому критична деградація геометрії сопла досягається при збільшенні номінального розміру a лише на 12% , що показує гіперчутливість системи до цього параметру.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Мета, об'єкт та задачі експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є перевірка адекватності моделювання гідродинаміки факела розпилення щілинного розпилювача гідравлічного типу сільськогосподарського обприскувача, уточнення та обґрунтування конструктивних параметрів для встановлення впливу геометричної форми вихідного отвору на якість розпилення робочої рідини.

Об'єктом експериментальних досліджень є щілинний розпилювач гідравлічного типу сільськогосподарського обприскувача.

Предметом експериментальних досліджень є залежність характеру розпилення робочої рідини від технічних параметрів щілинного розпилювача гідравлічного типу сільськогосподарського обприскувача.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- на основі математичного моделювання процесів розпилення рідини щілинним розпилювачем сільськогосподарського обприскувача визначити параметри технічного стану, які мають визначальне значення для досягнення якісного розпилення робочої рідини;
- на основі огляду відомих технологій і обладнання розробити стенд для високоточного випробування щілинних розпилювачів гідравлічного типу та провести обґрунтування його основних параметрів;
- розробити методику експериментальних досліджень із використанням лабораторного стенду;
- обґрунтувати зв'язок між параметрами технічного стану і конструкції щілинного розпилювача гідравлічного типу та якістю розпилення.

3.2 Методика формування розмірних груп щілинних розпилювачів гідравлічного типу

Дослідження проводились в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка в лабораторії кафедри оптимізації технологічних систем імені Т.П. Євсюкова.

Для можливості перевірки результатів математичного моделювання, яке було представлено в розділі 2, отримання експериментальних результатів було досягнуто наступним чином. Щілинні розпилювачі гідравлічного типу були розділені на 4 розмірні групи за шириною соплового отвору a , яка складала 0,63 мм, 0,67 мм, 0,71 мм та 0,75 мм відповідно.

Для фізичного створення вищезгаданої геометрії соплового отвору було використано розпилювачі з однієї партії. Спочатку було відібрано 20 нових розпилювачів, розмір соплового отвору яких дорівнює $a=0,63$ мм. Відбір був здійснений за допомогою універсального вимірювального мікроскопу УІМ-21 (рис. 3.1), технічні характеристики якого вказані в табл. 3.1.



Рисунок 3.1 – Універсальний вимірювальний мікроскоп УІМ-21

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики універсального вимірювального мікроскопа УІМ-21

Показник	Значення
Границі виміру довжин:	
- в поздовжньому напрямку	0-300 мм
- в поперечному напрямку	0-200 мм
Границі виміру кутів	0-360°
Ціна найменшого поділу спірального окулярного мікрометра	0,001 мм
Ціна найменшого поділу штрихової окулярної головки	1'

Методика процесу вимірів була за проекційним (тіньовим) методом. Для вимірів розпилювачі поміщали в центрі столу мікроскопа. Потім встановлювали одну із штрихових ліній сітки окулярної головки паралельно утворюючій конус вимірюваного сопла розпилювача в його основі. Переміщували поздовжню та поперечну каретки до тих пір, поки кінець утворюючого конуса вимірюваного сопла розпилювача у вершини не з'явиться у полі зору мікроскопа, при цьому паралельність утворюючої та штрихової лінії сітки не мала порушуватися. Після цього встановлювали подовжню каретку на відлік (в цілих міліметрах) за шкалою поздовжнього ходу та закріплювали її. Далі, діючи поперечною кареткою, поєднували штрихову лінію сітки з утворюючою тіньового контуру, і проводили відлік шкалою поперечного ходу. Потім переміщували поздовжню каретку на ціле число міліметрів до іншого кінця конуса, переміщенням поперечної каретки поєднували штрихову лінію сітки з утворюючою тіньового контуру і знову знімали відлік за шкалою поперечного ходу. Різниця обох відліків за шкалою, поділена на довжину переміщення поздовжньої каретки у міліметрах, давала тангенс половини кута утворюючого конуса розпилювача. Згідно з інструкцією по експлуатації універсального вимірювального мікроскопа [105], отриманий результат не буде вільний від похибки, що виникла внаслідок можливого перекосу розпилювача. Для виключення впливу цієї похибки повторювали такий же вимір на іншій

стороні тіньового зображення утворюючого конуса. Було очевидно, що похибка від перекосу увійде і в цей результат, але зворотним знаком. Для виключення цієї похибки взяли середнє арифметичне з обох результатів вимірювання. Варто зауважити, що при відборі розпилювачів з нової партії мало місце відхилення розміру (a) соплового отвору $\pm 0,01$ мм, тобто розпилювачі, які не були в експлуатації, мають відмінності за центральною геометрією, що свідчить про те, що вони мають дефекти вже під час виробництва, які впливають на якість розпилення рідини.

З відібраних 20 штук розпилювачів відібрали першу розмірну групу (група I) у кількості 5 штук, які в подальшому вважаються еталонними.

Для створення змін в геометрії сопла розпилювачів використовували стенд Roland EGX-400 (рис. 3.2.), основні технічні характеристики якого надані в табл. 3.2, та набір мікрофрез.



Рисунок 3.2. – Загальний вигляд стенда Roland EGX-400

Було змінено геометричні розміри соплового отвору інших трьох груп розпилювачів для досягнення геометрії, яка відповідає розмірам, які були обрані при імітаційному моделюванні витрати рідини в розділі 2.

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики станда Roland EGX-400 [106]

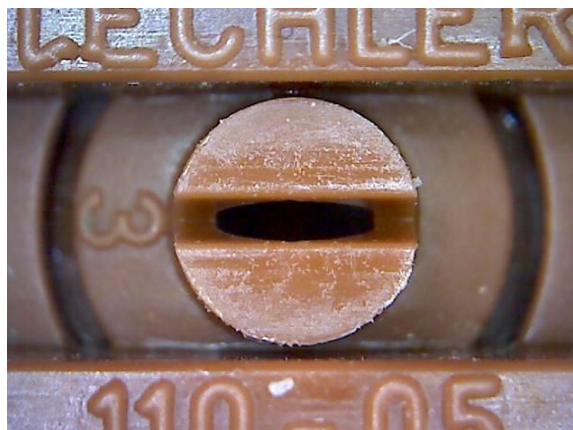
Максимальна робоча область (X, Y, Z)	407 мм (X) x 305 мм (Y) x 42.5 мм (Z)
Допустима товщина матеріалу	до 40 мм
Швидкість обертання шпинделя	від 8000 до 30000 об/хв.
Швидкість подачі (осі XY)	від 0.5 мм/сек до 100 мм/сек
Швидкість подачі (вісь Z)	від 0.5 мм/сек до 50 мм/сек



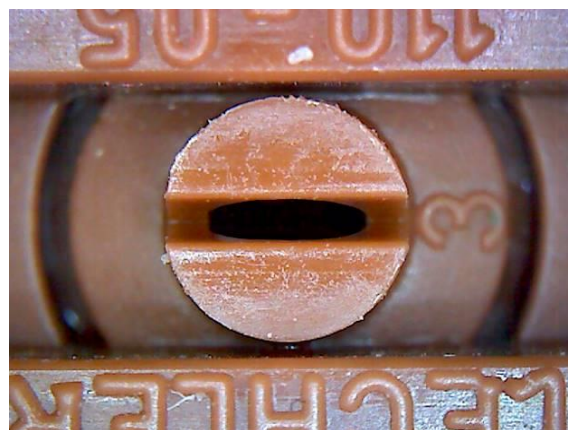
Рисунок 3.3 – Налаштування станда Roland EGX-400 на роботу з розпилювачем

Особливостями вибору саме цього станда було те, що він дозволяє оброблювати різні матеріали, зокрема дерево, пінополіуретан, пластик, акрил, а також легкі метали, такі як латунь і алюміній, підходить як для двовимірного, так і для тривимірного гравіювання та фрезерування. Використання технології Feed Forward Processing (FFP) забезпечує оптимальну швидкість роботи при високій якості завдяки прогнозуванню переміщення інструмента. Стенд оснащений електронними зондами, що дозволяє проводити роботи по викривлених поверхнях із автоматичним визначенням глибини, а інтуїтивно

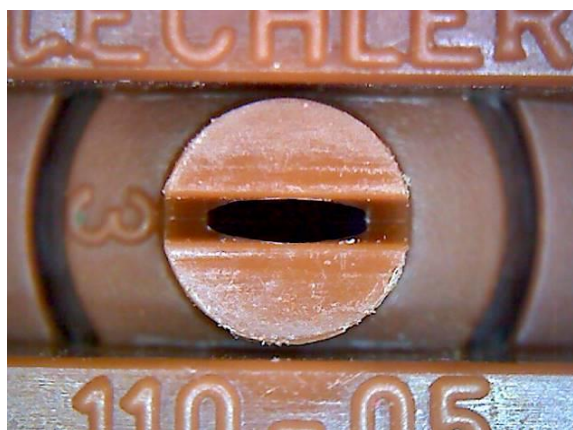
зрозуміле програмне забезпечення дає змогу швидко отримувати професійні результати.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.4 – Фронтальний вид сопла розпилю розмірних груп:

а) 0,63 мм; б) 0,67 мм; в) 0,71 мм; г) 0,75 мм

Процес зміни геометрії сопла розпилювача полягав в наступному: закріплення розпилювача на столі станка соплом вверх, завдання початкових точок (origin) для осей X , Y , Z . Потім за допомогою програмування через САМ-софт задавались траєкторії руху, тобто координати X , Y , Z та швидкість шпинделя. Його швидкість підбиралась через вбудовану систему “teaching” для оптимізації впливу температури, яка виникала при обертанні фрези, щоб врахувати можливе оплавлення країв або створення сколів.

В результаті проведених робіт було створено чотири розмірні групи розпилювачів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Розмірні групи створених щілинних розпилювачів

Група	Кількість, шт.	Ширина соплового отвору a , мм
Група I (еталон)	5	$0,63 \pm 0,01$
Група II	5	$0,67 \pm 0,03$
Група III	5	$0,71 \pm 0,03$
Група IV	5	$0,75 \pm 0,03$

Всі подальші дослідження проводились з використанням виключно розпилювачів даних розмірних груп.

3.3 Обґрунтування технічних та конструктивних параметрів лабораторного стенду для дослідження щілинних розпилювачів

Для проведення досліджень та обґрунтування основних технічних та конструктивних параметрів щілинних розпилювачів було виготовлено лабораторний стенд, креслення якого приведено нижче (рис. 3.5-3.6) [107].

Лабораторний стенд включає в себе: бак 1 (з забірним патрубком 1a, патрубком 1b і ніпелем 1c для підведення стисненого повітря, заливною горловиною 1d і зливним ніпелем 1e), матрицю верхню 3, опора стенда 4, дві розпірні втулки 5, дві стійки 6, балку 7, притискний диск 8 з ніпелем 8a і прокладкою 8b, вкладиш 9, відвідний пристрій 10, опорну втулку 11, рукав гофрований 12, штифти-фіксатори 13 і 14, прокладку 15, гайку-заглушку 16, кран 17, ніпель 18, еластичний трубопровід 19, прокладку 20, пробку заливної горловини 21, чотири боковини 22, два кільця ущільнювачів 23, 24 і одне стопорне 25, а також гайки, шайби болти і гвинти 26-33. Лабораторний стенд виконано з матеріалів, які мають високу стійкість до корозії, а саме з капролону (розпірні втулки 5, стійки 6, балка 7) та литого органічного скла (матриця нижня 2, матриця верхня 3), характеристики яких приведено в табл. 3.4, 3.5.

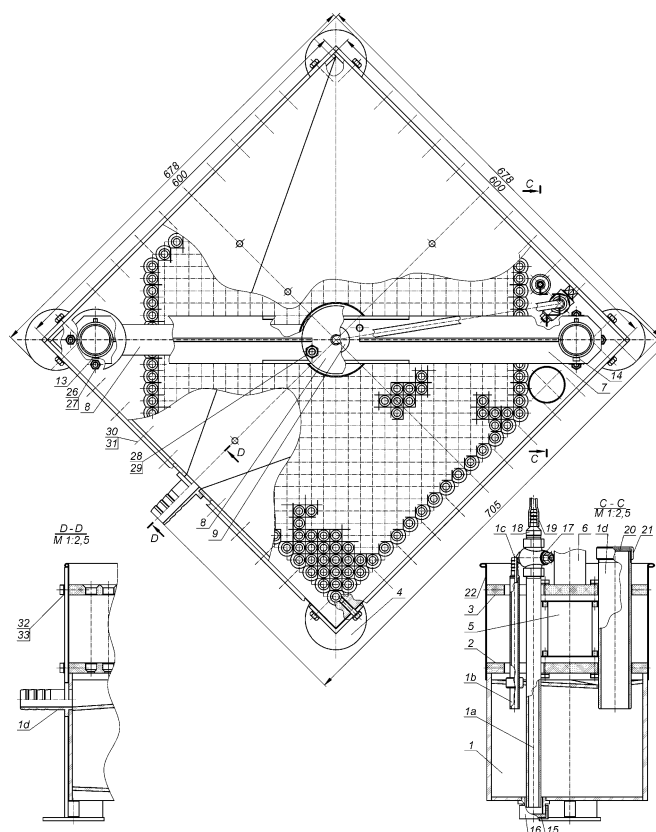


Рисунок 3.5 – Креслення лабораторного стану для дослідження щілинних розпилювачів (вигляд зверху)

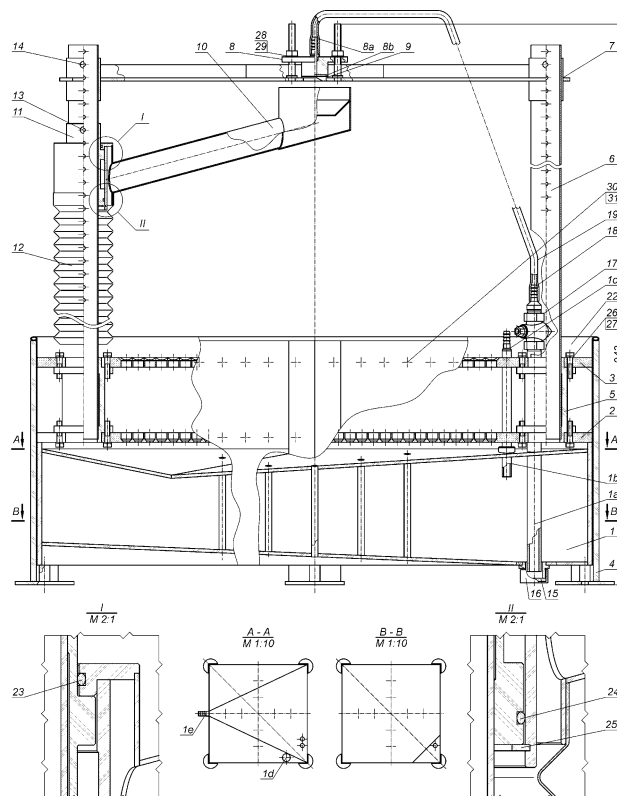


Рисунок 3.6 – Креслення лабораторного стану для дослідження щілинних розпилювачів (вигляд збоку)

Таблиця 3.4 – Фізико-механічні показники капролону

Параметри	Значення
Щільність	1,145 г/см ³
Температура плавлення	+200°C
Працездатність при температурі	від -60°C до +120°C
Міцність при розтягуванні	80 МПа
Відносне здовження	>20%
Напруга при відносній деформації, рівній 25%	95 МПа
Водопоглинання за 24 години	0,3%
Коефіцієнт теплопровідності	0,26 Вт/м °C
Середній коефіцієнт теплового розширення	$8 \cdot 10^{-3}$ °C
Питомий поверхневий опір	$1 \cdot 10^{12}$ Ом
Діелектрична проникність	при частоті 10^3 Гц – 3,7
Твердість по Шору Д	84
Міцність на удар	5,6 кДж/м
Міцність на згин	105 МПа
Модуль згину	330 МПа

Таблиця 3.5 – Фізико-механічні показники литого органічного скла

Параметри	Значення
Щільність	1,19 г/см ³
Температура плавлення	+200°C
Міцність при розтягуванні при температурі 23°C	80 МПа
Міцність на згин	110 МПа
Твердість по Роквелу	95 М-шкала
Температура теплової деформації	>93°C
Водопоглинання	0,3%
Коефіцієнт лінійного термічного розширення	0,065 мм/м°C
Працездатність при температурі	від -40°C до +80°C



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд лабораторного стенду

Капролон – це конструкційний полімер (полікапроамід), що належить до групи поліамідів. Відрізняється високою міцністю, пружністю та зносостійкістю, що робить його ефективною альтернативою кольоровим металам. Переваги капролону виділяються у механічну (висока ударна в'язкість та міцність на розтяг і вигин, висока еластичність, висока стійкість до абразивного спрацювання, має низький коефіцієнт тертя, має низьку масу), температурну (робочий діапазон - $-40\dots+100\text{ }^{\circ}\text{C}$) та хімічну (стійкість до масел, мастил, палива, слабких кислот та лугів) стійкість і надійність.

Лите органічне скло – це високоякісний прозорий термопласт, отриманий методом полімеризації мономеру метилметакрилату в формах. Лите органічне скло істотно краще за екструдоване у плані міцності, стабільності та оброблюваності.

Використання саме литого органічного скла в лабораторному стенді обумовлене низкою його фізико-механічних характеристик, а саме:

- відсутність внутрішніх напружень – менша ймовірність тріщин;
- висока жорсткість і твердість;
- ударна міцність, ніж у звичайного скла (у 5–7 разів міцніше);
- робочий діапазон температур – 40...+ 80 °С;
- стійкість до ультрафіолету;
- витримує вплив мийних засобів, слабких кислот, олив;
- не поглинає вологу в значних кількостях, зберігає геометрію;
- не плавиться і не дає "білих" країв при механічній обробці;
- при обробці лазером дозволяє використовувати високу швидкість і мінімальну енергію, що дає менше оплавлень.

Креслення матриць лабораторного стенду та їх основні розміри представлено на (рис. 3.8).

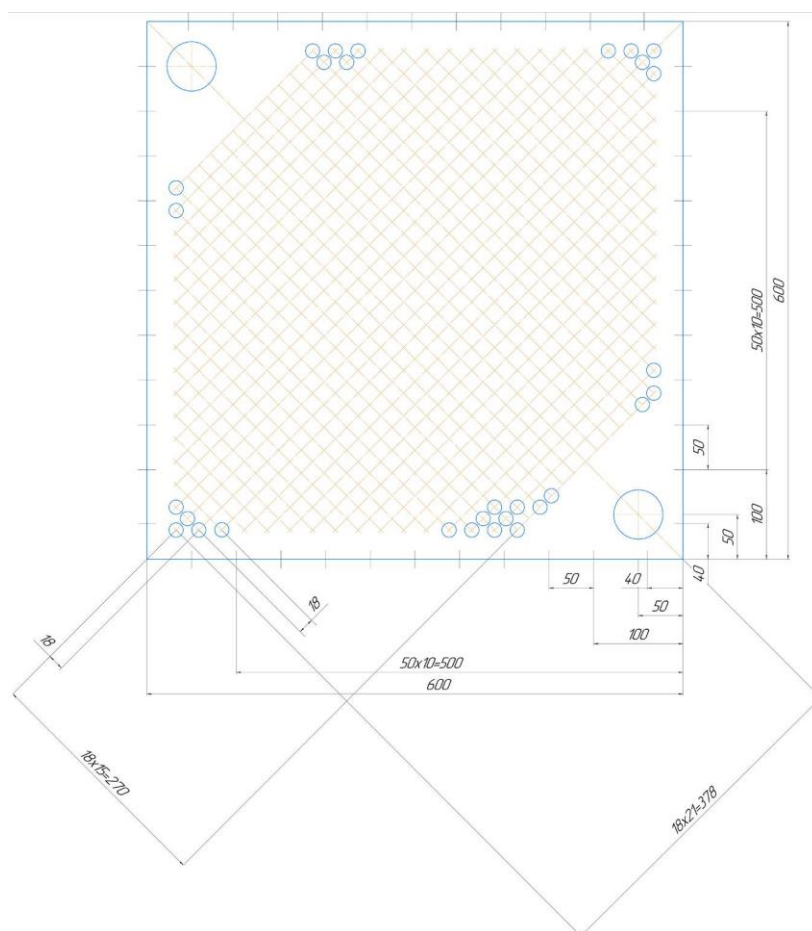


Рисунок 3.8 – Креслення матриць лабораторного стенду

Відмінність між нижньою і верхньою матрицями полягає лише у тому, що нижня матриця має менший нижній діаметр отворів для пробірок для запобігання випаданню пробірок у піддон стенду, але дозволяє скапування рідини. Розміри матриці і форма розташування отворів для пробірок обумовлені стандартом [92], при якому висота розміщення розпилювача при дослідженнях повинна бути такою, при якій розпилення робочої рідини максимально не виходить за кордони наявних в матриці пробірок. В подальшому висота встановлення розпилювачів для проведення дослідів дорівнювала 500 мм.

Пробірки лабораторні П2-14-120, які використовуються в лабораторному стенді, виготовлені з типового боросилікатного скла діаметром 14 мм, довжиною 100 мм, мають діапазон робочих температур від $-40 \dots +500$ °С, стійкі до хімічних реактивів та механічного зношення.

Бак для робочої рідини має зварну металеву конструкцію об'ємом 10 літрів. Об'єм бака обумовлений максимальною витратою рідини розпилювачами гідравлічного типу за хвилину роботи [82-83]. В його внутрішній порожнині встановлено еластичну резинову мембрану, яка унеможлиблює контакт робочої рідини і повітря, внаслідок чого досягається чистота робочої рідини (відсутність бульбашок повітря в рідині, що може вплинути на якість транспортування по патрубкам та виникнення дисперсності робочої рідини загалом).

Робота стенду: бак 1 заповнюється через заливну горловину 1d і завдяки прокладці 20 герметично закривається різьбовою пробкою 21. Відбір рідини до розпилювача здійснюється через забірний патрубок 1a (всередині гайки-заглушки 16). Гайка-заглушка 16 ущільнюється герметично за допомогою прокладки 15. До розпилювача рідина витісняється з бака під впливом стисненого повітря, яке підводиться через патрубок 1b і ніпель 1с. При досягненні певного тиску запірний кран відкривають і тиск повітря через мембрану видавлює воду в патрубок, який з'єднаний з щільним розпилювачем запірним шаровим краном 17. Таким чином досягається вирівнювання

необхідного тиску рідини, який нагнітається за допомогою компресора, в усій системі. Щоб попередити роздування бака 1 під впливом тиску зсередини, його верхня та нижня стінки пов'язані між собою елементами жорсткості. Забірний патрубок 1а у своїй верхній частині має різьбове з'єднання з краном 17, який, у свою чергу, різьбовим способом з'єднаний з ніпелем 18, а останній з еластичним трубопроводом 19. Горизонтально розташовуються дві матриці: нижня 2 і верхня 3. Обидві плоскі матриці. Отвори верхньої матриці з мінімальним діаметром 14 мм – для пробірок прохідні. А отвори нижньої матриці тільки у верхній частині мають діаметр 14 мм, а внизу звужуються до 10 мм. Матриці розташовуються одна над одною на відстані, яка менша за довжину пробірок, і задається висотою розпірних втулок 5. Верхню матрицю 3 пробірки пронизують, тому для них ця матриця виконує роль бічної підтримки. Отвори нижньої матриці 2 для пробірок не прохідні та як поглиблення виконують роль вертикальної підтримки. Всередину розпірних втулок 5 з невеликим натягом розміщені вертикальні стійки 6, які орієнтовані за нормаллю до площини матриць 2 і 3 і височіють над ними. Ці стійки 6 служать для кріплення балки 7. Балка 7 розташовується горизонтально і паралельно матрицям 2, 3 з можливістю плоско-паралельного переміщення по стійкам 6. Фіксується балка 7 на певній висоті штифтами 14, для яких у стійках 6 просвердлений ряд отворів. У центрі балки 7 є вузол кріплення розпилювача, що складається з притискного диска 8 з ніпелем 8а і прокладкою 8b, а також вкладиша 9 і елементів різьбового кріплення 28, 29. Досліджуваний розпилювач розташовується вертикально і затискається елементами різьбового кріплення 28, 29 між притискним диском 8 і вкладишем 9. Приклеєна до притискного диска 8 гумова прокладка 8b служить ущільненням. Підведення рідини до розпилювача здійснюється через ніпель 8а та гнучкий трубопровід 19, який другим кінцем з'єднаний з забірним ніпелем 18 бака 1. Відвідний пристрій 10 служить для збирання та видалення технологічної рідини, що розпилюється розпилювачем у незаліковий час, тобто протягом виходу його на нормативний режим роботи. Закріплено відвідний пристрій 10 на опорній втулці 11 з

можливістю повороту навколо неї, а, отже, навколо стійки 6. Конструкція відвідного пристрою 6 виконана у вигляді чаші, розташованої на кінці консольної труби. Усередині чаші є зворотний конус, який запобігає виплескуванню технічної рідини, що потрапила всередину чаші після розпилю її розпилювачем. Ущільнюється відвідний пристрій 10 з опорною втулкою 11 за допомогою гумових кілець 23, 24, а фіксується від осьового зміщення стопорним кільцем 25. У нижній своїй частині відвідний пристрій 10 пов'язаний з гофрованим рукавом 12, який охоплює собою стійку 6. Відвідний пристрій 10, опорна втулка 11 і рукав 12 (далі вузол 10 - 12) разом утворюють канал для відведення технічної рідини з чаші відвідного пристрою 10 на поверхню матриці 3 осторонь пробірок. Вузол 10 - 12 може дискретно переміщатися вертикально вздовж стійки 6. У кожному новому положенні він фіксується штифтом-фіксатором 13. Таке вертикальне переміщення вузла 10 - 12 здійснюється відповідно переміщенню балки 7, щоб забезпечити мінімальний зазор між забірною чашею відвідного пристрою 10. Це мінімізує можливість розбризкування технологічної рідини після розпилення її розпилювачем протягом виходу останнього на усталений режим, коли рідина подається в чашу відвідного пристрою 10 для видалення.

Для обробки отриманих значень ваги робочої рідини використовуються спеціальні ваги дискретністю 0,001 грам, технічні характеристики яких наведено в табл. 3.4, які з'єднанні з комп'ютером.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики ваг моделі FC-50

Максимальна вага зважування	50 гр.
Точність	0,001 гр.
Дисплей	LCD
Одиниці виміру	грами
Робоча температура	від +10°C до +30°C
Інтерфейс	USB 2.0
Додаткові опції	вбудований рівень положення ваг

З'єднання з комп'ютером було забезпечено удосконаленням ваг шляхом обладнання інтерфейсом USB 2.0. Дані обробляються за допомогою налаштування для Microsoft Excel на базі Visual Basic for Application (VBA). Microsoft Excel при отриманні даних з порту USB 2.0 автоматично вносить в необхідну клітинку отримане значення для подальших розрахунків. Важливим фактором процесу зважування є чітка послідовність зважування пробірок. Перед початком зважування пробірок ваги калібрували за допомогою еталонних калібрувальних гирьок, які є в комплекті ваг. Для цього ваги встановлювали на рівну поверхню столу, потім ваги вмикали і встановлювали по центру столу ваг еталонну калібрувальну гирьку вагою 20 грамів. Якщо ваги показували вагу, яка не співпадала з вагою еталонної калібрувальної гирьки, ваги регулювали по площині в системі координат шляхом зміни висоти кожної з чотирьох стійок ваг. При досягненні оптимального положення еталонну калібрувальну гирьку прибирали. Після калібрування на стіл ваг встановлювали штатив-тримач з однією пробіркою (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Штатив-тримач з пробіркою

Вагу штатива-тримача і пробірки шляхом програмування ваг «скидали» до нуля, щоб отримати вагу тари. Після проведення експерименту кожену

пробірку з наявною в ній рідиною вставляли в штатив-тримач. Значення ваги рідини в пробірці ваги передавали через порт USB 2.0 до комп'ютера.

3.4 Методика проведення експериментального дослідження щілинних розпилювачів

Методика проведення експериментального дослідження щілинних розпилювачів проходить в два етапи (етап налаштування, етап випробування), блок-схема якої представлена на (рис. 3.10) [108].

Методика проведення експериментального дослідження щілинних форсунок гідравлічних розпилювачів проходить в два етапи (етап налаштування, етап випробування) та полягала в наступному:

1. Відгвинтивши гайки 28 і знявши шайби 29, знімають притискний диск 8. Між вкладишем 9 і диском 8 співвісно їм укладають орієнтований вертикально вниз розпилювач, а диск 8 опускають на шпильки кріплення, після чого повертають назад шайби.

2. Гайки 28 затягують до тих пір, поки розпилювач трохи зануриться в тіло прокладки 8b, для створення герметичного з'єднання, здатного витримати тиск 20 - 40 МПа, максимум 100 МПа.

3. Вилучається штифт-фіксатор 13, відвідний пристрій 10 разом з деталями, приєднаними до нього опускають вниз.

4. Виймаються штифти-фіксатори 14, балку 7 переміщують на необхідну висоту і фіксують там, повернувши на місце штифти 14. Після цього відвідний пристрій 10 піднімають вгору, максимально близько до балки 7, і також фіксують там штифтом 13.

5. Шляхом повороту навколо опорної втулки 11, розташовують строго під балкою 7, а значить, і під розпилювачем.

6. Потім у всі 810 отворів матриць 2, 3 поміщають лабораторні пробірки, які повинні бути сухі без залишків рідини від попередніх дослідів

7. Бачок через горловину 1d заповнюють робочою рідиною і герметично закривають різьбовою пробкою 21. Зливний ніпель 1e з'єднують з каналізацією.

8. Оскільки робота стенду передбачає наявність компресора, то до цього моменту останній вже повинен бути включеним, а повітря в його ресивері має бути під робочим тиском. Заданий робочий тиск в ресивері компресора підтримується автоматично.

9. З бачком стенда 1 ресивер компресора з'єднується по гнучкому трубопроводу через ніпель 1c і патрубок 1b. Кран 17 в цей момент повинен бути закритим, а ніпель 18 за допомогою гнучкого трубопроводу 19 з'єднаний з ніпелем 8a притискного диска 8.

10. Відкриваємо робочий кран 17, вичікуємо 30 секунд, поки розпилювач вийде на усталений режим розпилю.

11. Відвідний пристрій 10 переводиться у положення відкрито – у бік від балки 7. Одночасно з цим вмикається замір часу на секундомірі.

12. Час випробування становить 1 хвилину (60 секунд). Поки розпилювач працює відвідний пристрій 10 повертають навколо стійки 6 максимально близько до балки 7. У такому стані розпил продовжується весь час випробування.

13. По завершенню визначеного часу дослідження (60 с.) чашу відвідного пристрою 10 підводять під балку 7 (закриваючи розпилювач). Після цього кран 17 закривають, демонтують розпилювач, а компресор вимикають.

14. Кожну пробірку з наявною в ній рідиною вставляємо в штатив-тримач та зважуємо. Значення ваги рідини в пробірці фіксується на комп'ютері та заноситься до віртуальної матриці. Пробірки очищають від залишків рідини та просушують.

Відповідна послідовність дій повторюється для кожного розпилювача з чотирьох розмірних груп. Отримані результати обробляються статистичними методами та усереднюються для кожної розмірної групи.

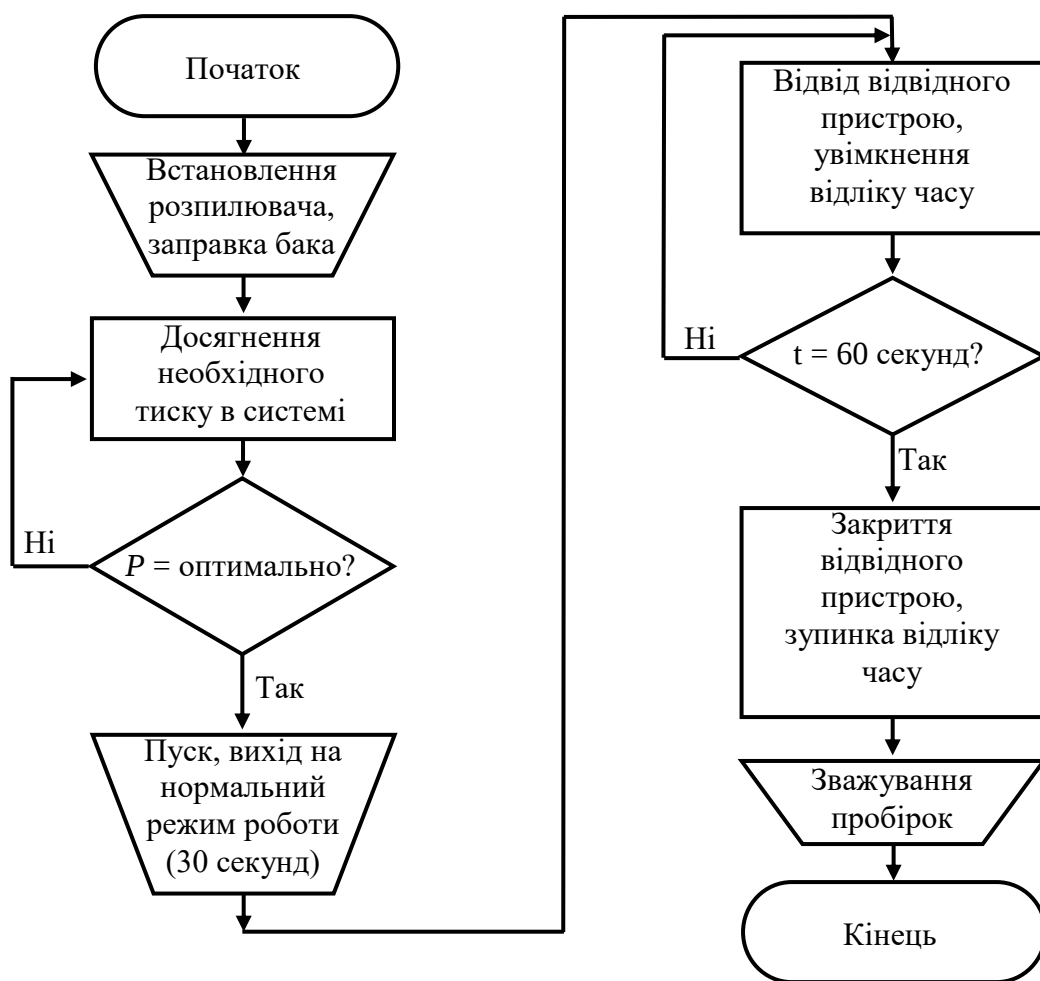


Рисунок 3.10 – Блок-схема проведення експериментального дослідження

Відповідна послідовність дій повторюється для кожного розпилювача з чотирьох розмірних груп. Отримані результати обробляються статистичними методами та осереднюються для кожної розмірної групи.

3.5 Обґрунтування методики прискореного аналізу характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку

У попередньому розділі чітко визначено, що імітаційне моделювання з використанням обчислювальної гідродинаміки при збільшенні точності розрахунків вимагає час та ресурси, тотожні з проведенням експерименту. Експериментальні та імітаційні дослідження одного зразка розпилювача

займають 1-2 доби у залежності від точності та кількості повторних експериментів, тому виникає необхідність скоротити час дослідження.

Основною проблемою для зменшення часу є великий обсяг даних, які треба проаналізувати (експеримент) або змодельовати (імітаційне моделювання). Одним з напрямків її вирішення є зменшення відстані до поверхні обробітку, що забезпечує зниження вимог до ресурсів. Як показано у роботі [72] та на (рис. 2.1), завдяки математичним обчисленням можна інтерпретувати дані щодо розподілу робочої рідини, отримані на площинах, що перетинають факел розпилення на різній відстані. Проте в обох типах дослідження це призведе до скорочення часу та витрачених ресурсів, але пропорційно вплине на точність отриманих даних. Другим варіантом є збереження відстані зі звуженням області аналізу до кількох ділянок на площині напилювання ω розміром $(a_2 - a_1) \times (b_2 - b_1)$ (рис. 2.2). Якщо проаналізувати результати імітаційного моделювання (рис. 2.13), то можна чітко визначити три осередки на площині напилювання ω , у яких зі збільшенням ширини соплового отвору збільшується масова частка рідин.

Спостерігаються три піки на поверхні обробки у центрі та симетрично з двох боків залежностей розподілу (рис. 2.13 б, в, г). Формування відповідних піків призводить до збільшення нерівномірності обробки та додатково підсилюється від сусідніх розпилювачів, оскільки при їх суміщенні для розрахунку коефіцієнту варіації відповідні бокові піки накладаються.

У роботі [72] запропоновано при моделюванні факелу розпилення рідини, прийняти, що він повністю розташовується всередині об'єму піраміди (рис. 2.1), основою якої є пляма розпилу ω , а вершиною точка O , початку системи координат O_{xyz} . Якщо інтерпретувати цей підхід до моделювання піків концентрації рідини то отримаємо піраміду Ω у середні якої будуть розміщені три піраміди піків $\Omega'_u, \Omega'_l, \Omega'_n$ (рис. 2.16).

Розміри $(a_2 - a_1)$ та $(b_2 - b_1)$ отримуємо на підставі імітаційного моделювання (експерименту). Висота h_0 розраховується, як висота піраміди,

об'єм якої задається розміром площини напилювання $(a_2 - a_1) \times (b_2 - b_1)$ та загальною витратою рідини G_{pid} :

$$h_0 = \frac{G_{pid} \cdot 10^{-3}}{(a_2 - a_1) \times (b_2 - b_1)}. \quad (3.1)$$

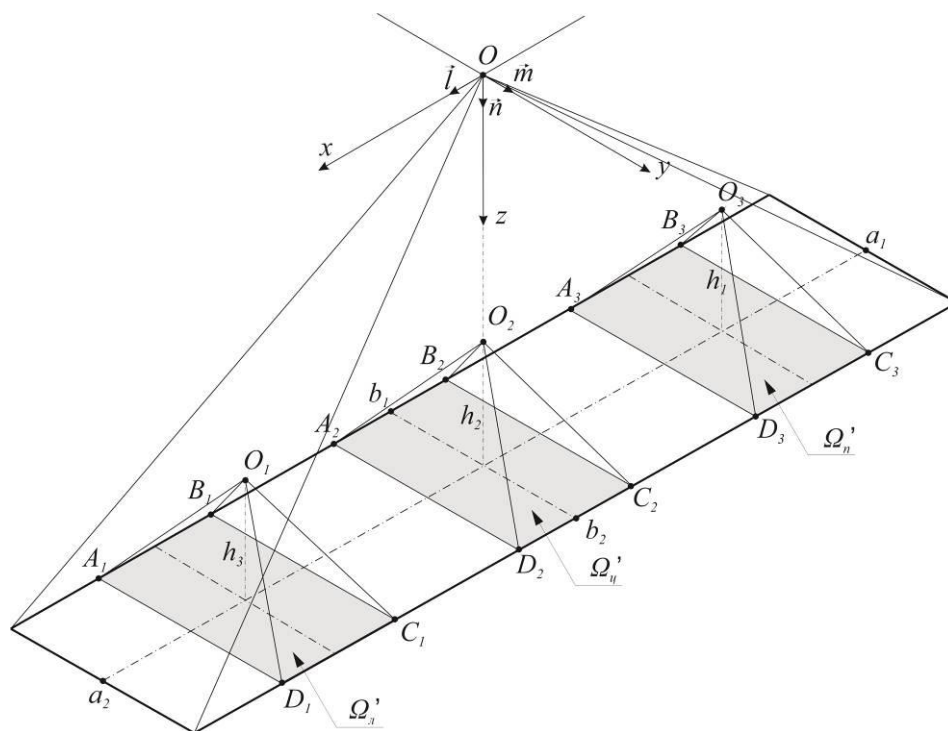


Рисунок 3.11 – Схема розподілу рідини по поверхні обробітку

Ширина основи пірамід Ω'_y , Ω'_x , Ω'_z співпадає з шириною площини напилювання, тобто $(a_2 - a_1) = A_n D_n = B_n D_n$. Довжина основи обирається однаковою для всіх пірамід і визначається центральним піком. У даному дослідженні на підставі аналізу імітаційного моделювання, приймаємо $A_n B_n = C_n D_n = 110$ мм.

Розміщення пірамід по площині напилювання визначається положенням вершини піраміди O_n або її проекцією на цю площину:

$$\text{- для } \Omega'_x \text{ точка } O_1 \frac{1}{4}(a_2 - a_1); \frac{1}{2}(b_2 - b_1);$$

- для Ω'_u точка $O_2 \frac{1}{2}(a_2 - a_1); \frac{1}{2}(b_2 - b_1)$;

- для Ω'_n точка $O_3 \frac{3}{4}(a_2 - a_1); \frac{1}{2}(b_2 - b_1)$.

Висота h_n розраховується за рівнянням (3.1), витрата рідини для кожної піраміди $G_{pid\ n}$ визначається на підставі залежностей розподілу. У результаті порівнявши значення h та Σh_n можна зробити висновок, щодо відсотка рідини, яка сконцентрована у осередках Ω'_u , Ω'_l , Ω'_n . Геометрична інтерпретація такого розподілу представлена на (рис. 3.12).

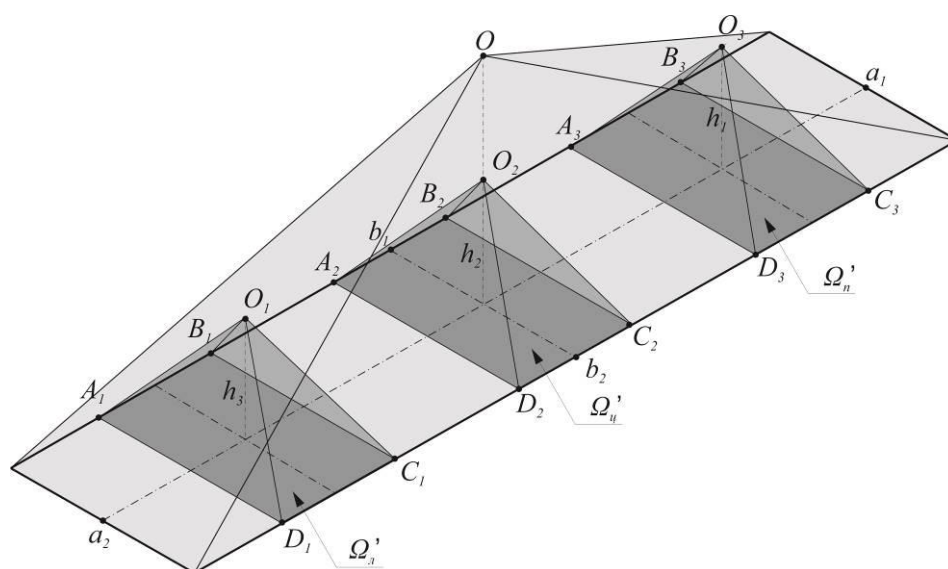


Рисунок 3.12 – Геометрична інтерпретація розподілу рідини по поверхні обробітку з виявленням осередків концентрації

Відсоток робочої рідини, що потрапляє на основи пірамід Ω'_u , Ω'_l , Ω'_n можна визначити за коефіцієнтом розподілу χ :

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^n h_n}{h_0}. \quad (3.2)$$

Таблиця 3.5 – Значення коефіцієнтом розподілу χ для різної ширини соплового отвору a , мм

Ширина соплового отвору a , мм	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,73	0,75
Коефіцієнт варіації CV, %	5,76	6,21	7,42	9,86	13,23	18,44	24,67
Коефіцієнт розподілу χ , %	54,75	58,60	61,26	63,55	66,26	70,19	75,8

Отримані значення коефіцієнту χ показують, який відсоток рідини потрапляє до осередків концентрації. Графічно взаємозв'язок коефіцієнтів: розподілу χ та варіації CV представлено на (рис 3.13).

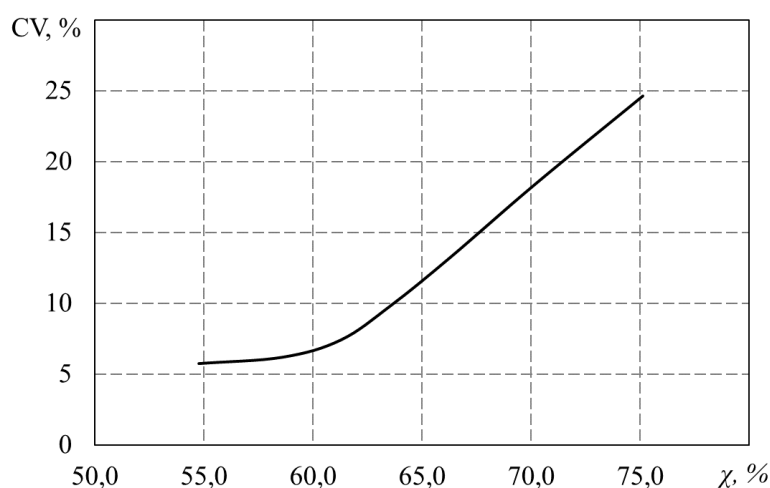


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнту варіації CV від коефіцієнту розподілу

У відповідності до представлених результатів виявлено, що для визначення коефіцієнта варіації CV немає необхідності аналізувати всю поверхню обробітку, достатньо визначити загальну витрату рідини G_{pid} та відсоток рідини, яка потрапляє на основи пірамід Ω'_c , Ω'_l , Ω'_n .

Також на (рис. 2.1), (рис. 2.2) ми бачимо, що розподіл рідини по поверхні обробітку є симетричним відносно соплового отвору розпилювача, додатково, це підтверджується експериментальними даними (рис. 2.3) [72]. Проте для експерименту симетрія спостерігається лише по довжині поверхні обробітку, по ширині спостерігається нерівномірність розподілу. Відповідне може бути прояснено наявністю незначного кута між центральною віссю розпилювача та

лінією a_1 ; a_2 , який виникає при неточності встановлення розпилювача. При імітаційному моделюванні такої нерівномірності не виявлено – розподіл симетричний, як по довжині, так і по ширині. Оговорений симетричний розподіл дозволяє при визначення коефіцієнту варіації аналізувати квадрант або половину поверхні обробітку, тоді рівняння (3.2) приймуть вид:

$$\chi_{\left(\frac{1}{2}\right)} = \frac{h_1 + 0.5 \cdot h_2}{0.5 \cdot h_0} \cdot 100\%; \quad (3.3)$$

$$\chi_{\left(\frac{1}{4}\right)} = \frac{0.5 \cdot h_1 + 0.25 \cdot h_2}{0.25 \cdot h_0} \cdot 100\%. \quad (3.4)$$

Щодо прискорених експериментальних досліджень, через відсутність симетрії відносно лінії a_1 ; a_2 , доцільно аналізувати данні отримані на половині площі обробітку, що з врахуванням звуження області аналізу до осередків концентрації рідини, дозволить суттєво скоротити час проведення експерименту для кожного зразка розпилювачів. Адекватність запропонованого прискореного методу потребує експериментального підтвердження, оскільки він базується виключно на результатах імітаційного моделювання.

3.6 Висновки по розділу

1. Обґрунтована методика та обладнання для зміни геометрії соплового отвору розпилювача, які дозволили створити чотири розмірні групи розпилювачів: 0,63 мм, 0,67 мм, 0,71 мм та 0,75 мм. Відповідні розмірні групи створені з комплекту нових розпилювачів однієї партії для можливості дослідження впливу розміру соплового отвору a на якість розпилення робочої рідини та характер її перерозподілу по поверхні обробки.

2. Розроблено конструкцію, обґрунтовано матеріали та створено стенд для високоточного випробування щілинних розпилювачів гідравлічного типу, який дозволяє імітувати роботу розпилювачів у польових умовах з можливістю варіювання експлуатаційних параметрів (відстань до поверхні обробітку, тиск, температуру тощо). Розроблено методику експериментальних досліджень, яка містить підготовчий та основний етапи та дозволяє отримати функціональні взаємозв'язки між якістю розпилення робочої рідини по поверхні обробітку для кожної з наведених розмірних груп розпилювачів.

3. Основною перевагою запропонованого обладнання та методики досліджень є можливість визначити зміни у характері розподілу рідини при різних геометричних розмірах соплового отвору, що дозволяє дослідити осередки концентрації рідини або, навпаки, зменшення її кількості у конкретних ділянках поверхні обробітку. Такий підхід дозволяє встановити чіткий взаємозв'язок між геометрією соплового отвору та якістю виконання технологічної операції захисту рослин.

4. Обґрунтовано методику прискореного визначення характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку, яка базується на зменшенні обсягу аналітичної інформації, за рахунок визначення осередків концентрації рідини, що полегшує математичний опис, завдяки чому аналіз розподілу рідини можна привести до одного, чи двох квадрантів, що суттєво скорочує час проведення експерименту. Граничному значенню $CV = 15 \%$ відповідає значення коефіцієнта розподілу $\chi = 67,5\%$.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЩІЛИННОГО ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗПИЛЮВАЧА

Метою експериментального дослідження є підтвердження теоретичних залежностей та встановлення емпіричних зав'язків між характером зміни розподілу робочої рідини по поверхні обробітку за умови зміни геометрії соплового отвору розпилювача.

Експериментальні дослідження проводяться у відповідності до методики, наведеної у третьому розділі, у повному та прискореному режимі для 4 груп розпилювачів (по 5 одиниць). Для кожної групи задані розміри, що відповідають розмірам, обраним при імітаційному моделюванні: 1 група – $a = 0,63$ мм; 2 група – $0,67$ мм; 3 група – $0,71$ мм; 4 група – $0,75$ мм. Тиск в системі встановлений на $0,4$ МПа. Час проведення дослідження 60 с. Тобто створені умови, які повністю відповідають умовам при імітаційному моделюванні.

4.1 Дослідження роботи щілинного гідравлічного розпилювача

У результаті проведення експериментальних досліджень, формування факелу робочої рідини для 1-4 груп розпилювачів, отримані поверхні розподілу рідини в межах площі матриці стенду, які наведені на (рис. 4.1).

При візуальному аналізі видно, що розподіл рідини по поверхні обробітку має характер подібний до отриманого при імітаційному моделюванні. Спостерігається збільшення нерівномірності та осередки концентрації рідини, які більш чітко ідентифікуються зі збільшенням розміру a (рис. 4.1 в, г). Наявне суттєве збільшення об'єму рідини у області центрального струменя (центрального піку). Також видно, що форма поверхні відклику дійсно може бути апроксимована за допомогою геометрії (правильної прямокутної піраміди).

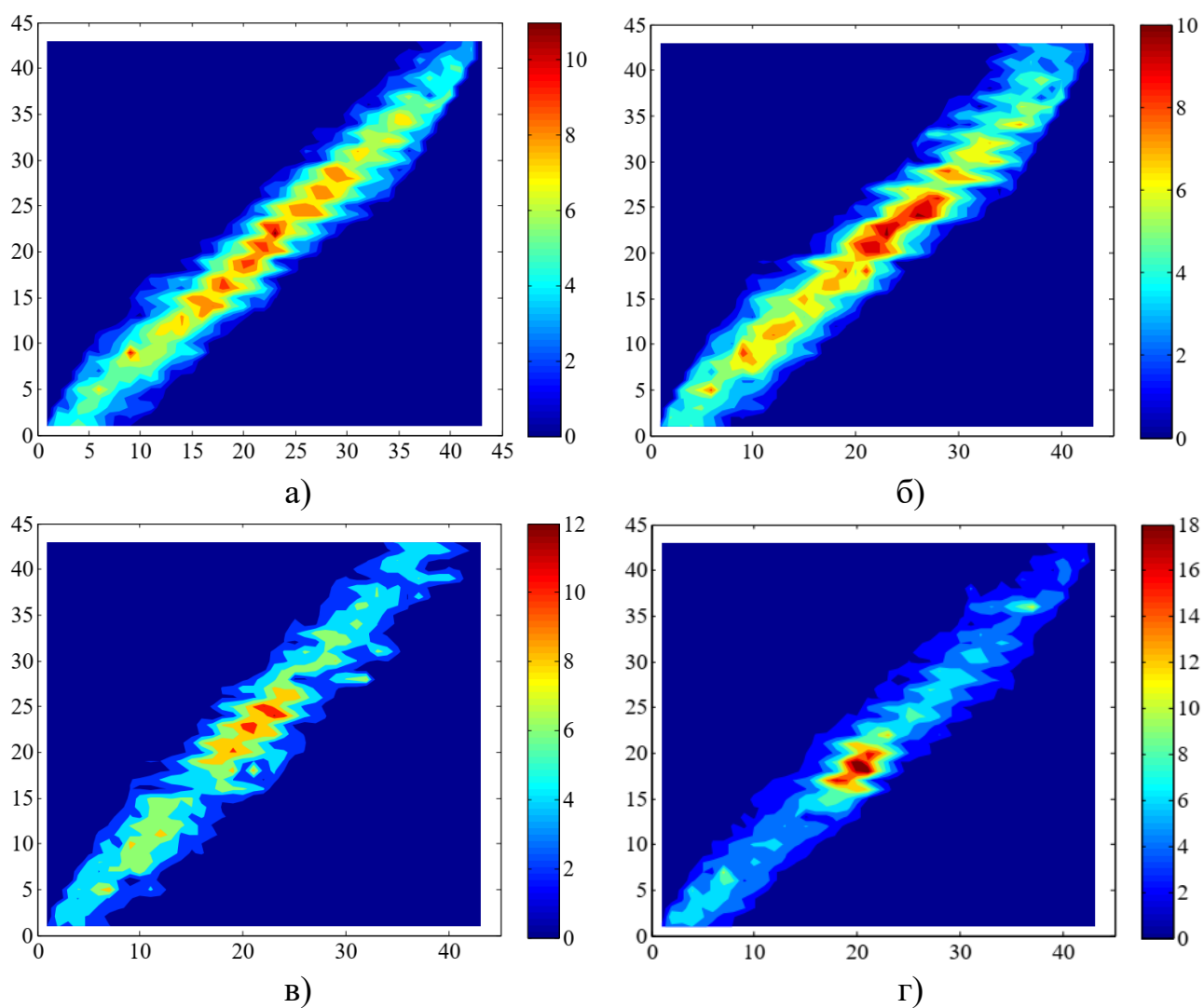
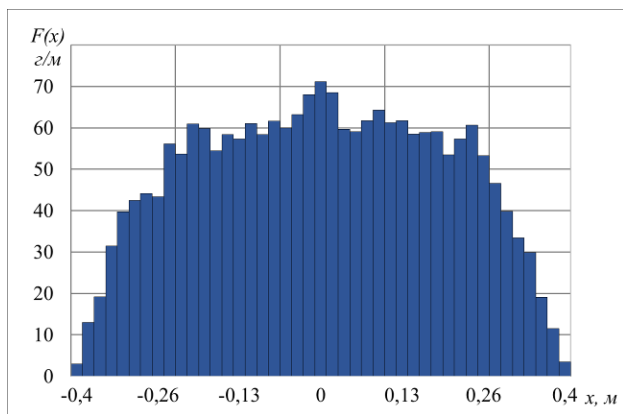
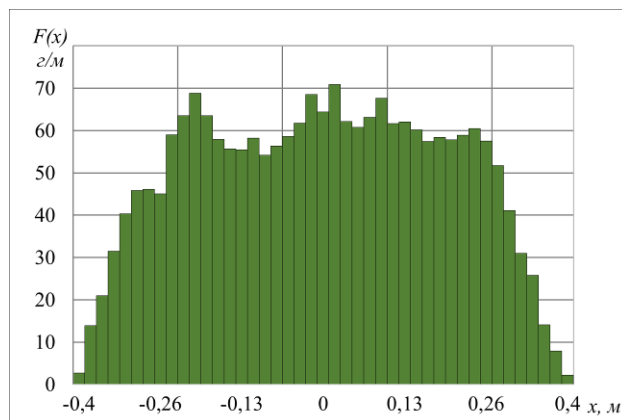


Рисунок 4.2 – Ізолінії розподілу робочої рідини по поверхні обробітку для розпилювачів 4 груп: 1 група – $a = 0,63$ мм; 2 група – $0,67$ мм; 3 група – $0,71$ мм; 4 група – $0,75$ мм

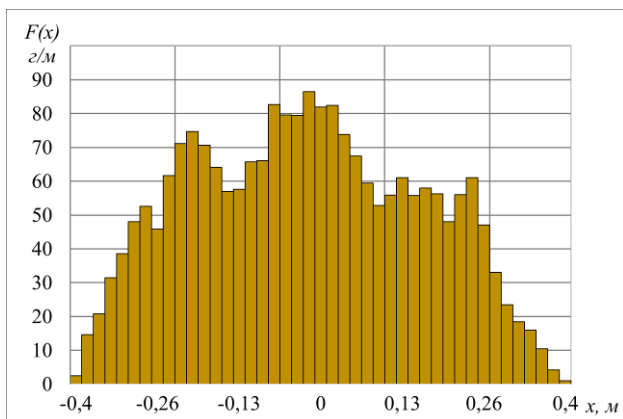
При приведенні розподілу рідини до осі O_x отримаємо гістограми розподілу да оговорених груп розпилювачів (рис. 4.3).



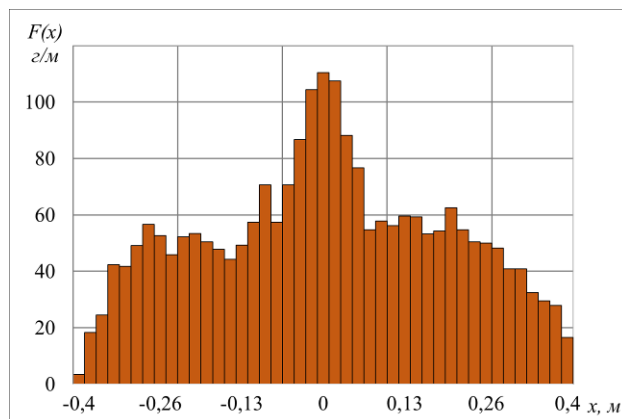
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.3 – Розподіл робочої рідини вздовж осі O_x для розпилювачів 4 груп:

1 група – $a = 0,63$ мм; 2 група – $0,67$ мм;

3 група – $0,71$ мм; 4 група – $0,75$ мм

За отриманими результатами спостерігається підвищення нерівномірності розподілу робочої рідини по поверхні обробітку для реальних розпилювачів. Відповідне пояснюється неточностями виготовлення самих розпилювачів та недосконалим методом імітації збільшення розміру соплового отвору, оскільки виявилось, що не можливо без похибок відтворити необхідний розмір у середині групи розпилювачів. На (рис. 4.1-4.3) наведені результати, отримані для випадкового розпилювача кожної групи. При розрахунку коефіцієнта варіації враховувались дослідження кожного розпилювача з 4 розмірних груп (рис. 4.4).

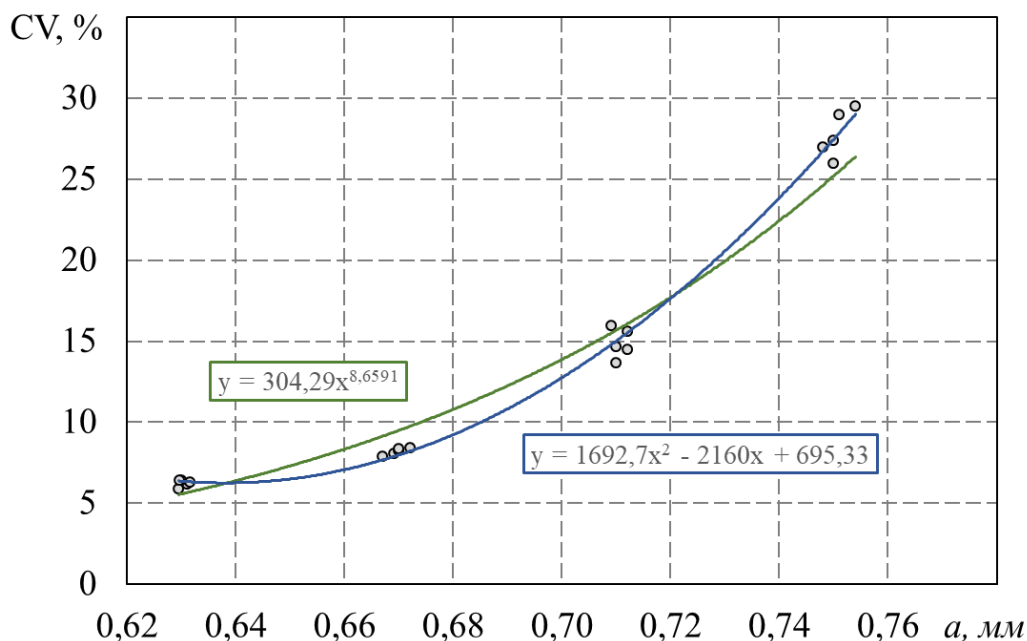


Рисунок 4.4 – Залежність зміни коефіцієнта варіації CV для розпилювачів 4 груп, отримані на підставі експериментального дослідження

Для апроксимації експериментальних даних необхідно підібрати рівняння регресії, що найбільш адекватно описує залежність результуючої змінної CV від факторної – a . Оскільки залежність не є лінійною, попередньо було отримано дві моделі, які найбільш близько описують отриману залежність. З використанням методу найменших квадратів для цих моделей отримані рівняння (рис. 4.4): степенева модель – $CV = 304,29 \cdot a^{8,6591}$ позначена (зеленим); квадратична модель – $CV = 1692,7 \cdot a^2 - 2160 \cdot a + 695,33$ позначена (синім). Для перевірки адекватності розрахуємо:

$$\text{Середня похибка, } \varepsilon_m, \% \quad \varepsilon_m = \frac{1}{n} \sum \frac{|CV_i - CV_{iT}|}{CV_i} \cdot 100\%; \quad (4.1)$$

$$\text{Максимальна похибка } \varepsilon_{\max}, \% \quad \varepsilon_{\max} = \max \left(\frac{|CV_i - CV_{iT}|}{CV_i} \cdot 100\% \right); \quad (4.2)$$

$$\text{Коефіцієнт детермінації, } R^2 \quad R^2 = 1 - \frac{\sum (CV_i - CV_{iT})^2}{\sum (CV_i - \bar{CV}_i)^2}. \quad (4.3)$$

Результати розрахунків наведені у табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Порівняння регресійних моделей для апроксимації експериментальних даних

№	Данні дослідження		Квадратична модель $CV = 1692,7 \cdot a^2 - 2160 \cdot a + 695,33$			Степенева модель $CV = 304,29 \cdot a^{8,6591}$		
	a_i	CV_i	CV_{it}	$\varepsilon, \%$	$CV_i - CV_{it}$	CV_{it}	$\varepsilon, \%$	$CV_i - CV_{it}$
1	0,630	5,90	6,38	8,1%	-0,48	5,53	6,3%	0,37
2	0,631	6,20	6,34	2,2%	-0,14	5,65	8,9%	0,55
3	0,630	6,40	6,36	0,6%	0,04	5,57	13,0%	0,83
4	0,632	6,30	6,33	0,4%	-0,03	5,68	9,8%	0,62
5	0,630	6,45	6,37	1,2%	0,08	5,55	14,0%	0,90
6	0,667	7,90	7,67	2,9%	0,23	9,13	15,5%	-1,23
7	0,669	8,10	7,88	2,8%	0,22	9,37	15,7%	-1,27
8	0,670	8,25	7,98	3,2%	0,27	9,49	15,1%	-1,24
9	0,672	8,45	8,21	2,9%	0,24	9,74	15,2%	-1,29
10	0,670	8,35	7,98	4,4%	0,37	9,49	13,6%	-1,14
11	0,710	13,70	15,02	9,6%	-1,32	15,68	14,4%	-1,98
12	0,712	14,50	15,51	7,0%	-1,01	16,07	10,8%	-1,57
13	0,710	14,70	15,02	2,2%	-0,32	15,68	6,7%	-0,98
14	0,712	15,60	15,51	0,6%	0,09	16,07	3,0%	-0,47
15	0,749	16,00	14,78	7,6%	1,22	15,49	3,2%	0,51
16	0,750	26,00	27,47	5,7%	-1,47	25,20	3,1%	0,80
17	0,748	27,00	26,72	1,0%	0,28	24,63	8,8%	2,37
18	0,750	27,41	27,47	0,2%	-0,06	25,20	8,1%	2,21
19	0,751	29,00	27,85	4,0%	1,15	25,49	12,1%	3,51
20	0,754	29,50	29,02	1,6%	0,48	26,39	10,5%	3,11
Середня похибка, $\varepsilon_m, \%$			3,4%			10,4%		
Максимальна похибка $\varepsilon_{max}, \%$			9,6%			15,7%		
Коефіцієнт детермінації, R^2			0,9938			0,9645		

За результатами розрахунків квадратична модель має більший коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9938$, що показує її більшу адекватність.

При порівнянні даних імітаційного моделювання (2 розділ) та результатів експериментального дослідження створимо розрахункову таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахункова таблиця для перевірки адекватності моделі імітаційного моделювання

№	Ширина соплового отвору a_i , мм	Коефіцієнт варіації імітаційного моделювання CV_{im} , %	Коефіцієнт варіації експериментальних досліджень CV_{iexp} , %	Похибка, ε_i , %
1	0,63	5,84	6,26	6,7%
2	0,64	5,95	6,36	6,5%
3	0,65	6,03	6,50	7,1%
4	0,66	6,53	7,07	7,6%
5	0,67	7,33	7,98	8,2%
6	0,68	8,43	9,23	8,7%
7	0,69	9,83	10,82	9,2%
8	0,7	11,54	12,75	9,5%
9	0,71	13,54	15,02	9,8%
10	0,72	15,85	17,63	10,1%
11	0,73	18,47	20,57	10,2%
12	0,74	21,38	23,85	10,4%
13	0,75	24,60	27,47	10,5%

Перевірку значимості проведемо з використанням критерію Фішера F :

$$F = \frac{\sum (CV_{im} - \bar{CV}_{im})^2}{m} \cdot \frac{n - m - 1}{\sum (CV_{iexp} - CV_{im})^2}. \quad (4.3)$$

Приймаємо $m = 3$; $n = 13$, тоді розрахункове значення критерію $F = 85,03$ у порівнянні з таличним $F_{кр} = 4,1$, тобто імітаційна модель є статистично значима на рівні значимості 0,05. Середня похибка моделювання ε_m становить 8,8 %, а максимальна $\varepsilon_{max} = 10,5$ %. Зменшення максимальної похибки можливо при використанні емпіричного коефіцієнту δ_{im} :

$$\delta_{im} = 0,834 \cdot e^{0,397 \cdot a_i}. \quad (4.4)$$

де a – поточна ширина соплового отвору розпилювача, мм.

Використання емпіричного коефіцієнту у рівнянні (2.99) дозволяє зменшити середню похибку моделювання ε_m до 2 %, а максимальну ε_{max} до 2,8 %.

4.2 Уточнення області працездатного стану розпилювача на підставі експериментальних даних

З врахуванням результатів експерименту уточнимо межу області працездатного стану (рис. 2.7) (2 розділ). Уточнена залежність зміни коефіцієнта варіації CV розподілу рідини по поверхні обробітку від зміни ширини соплового отвору (a) розпилювача наведена на (рис. 4.5).

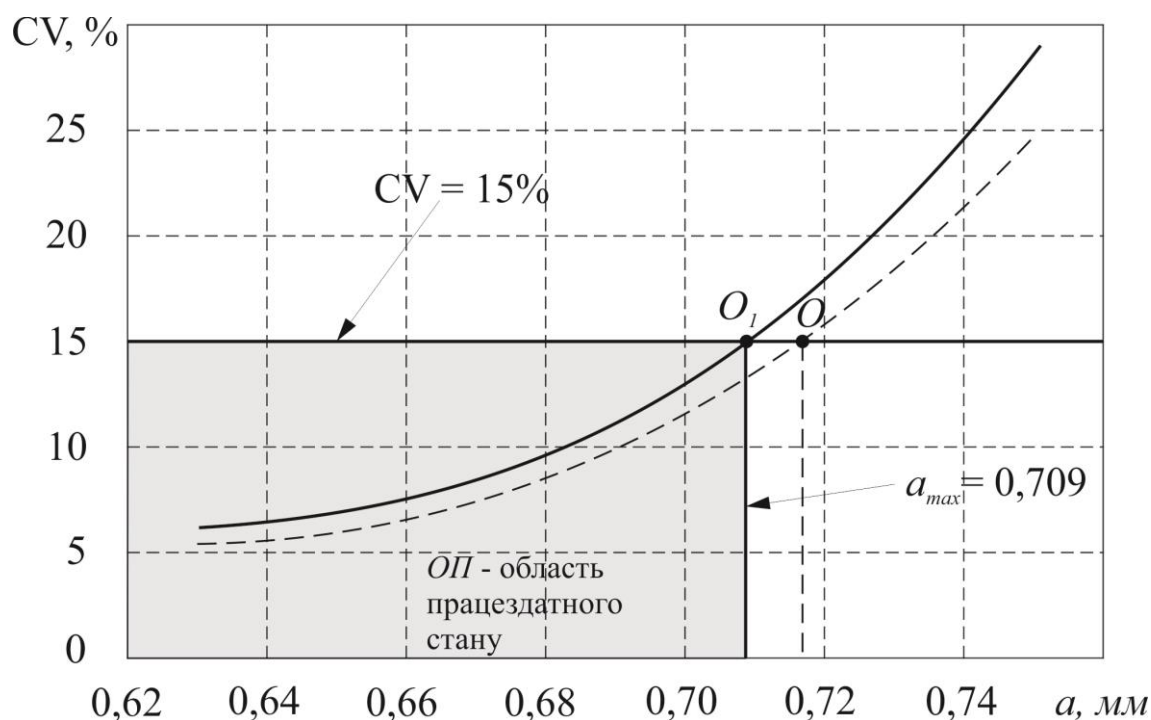


Рисунок 4.5 – Залежність зміни коефіцієнта варіації CV розподілу рідини по поверхні обробітку від зміни ширини соплового отвору

Крива коефіцієнту варіації за експериментальними даними перетинає пряму граничного значення коефіцієнту варіації ($CV = 15\%$) раніше, ніж при моделюванні у точці O_1 , тому максимальне значення a_{max} зменшується до

0,709 мм, як результат *ОП* також зменшується. Відповідне показує більш швидке досягнення межі коефіцієнта варіації для реальних розпилювачів.

Якщо розглянути криву коефіцієнту варіації, то можна констатувати, що збільшення коефіцієнту варіації на початку процесу зношення характеризується меншою крутизною кривої, ніж у області за межами *ОП*. Якщо окремо апроксимувати ці дві ділянки лінійною залежністю, то отримає точку O_2 . При перенесенні цієї точки на криву *CV* (O'_2) проведемо перпендикуляри на осі абсцис і ординат. У результаті отримаємо область справного стану розпилювача *ОС* (рис. 4.6).

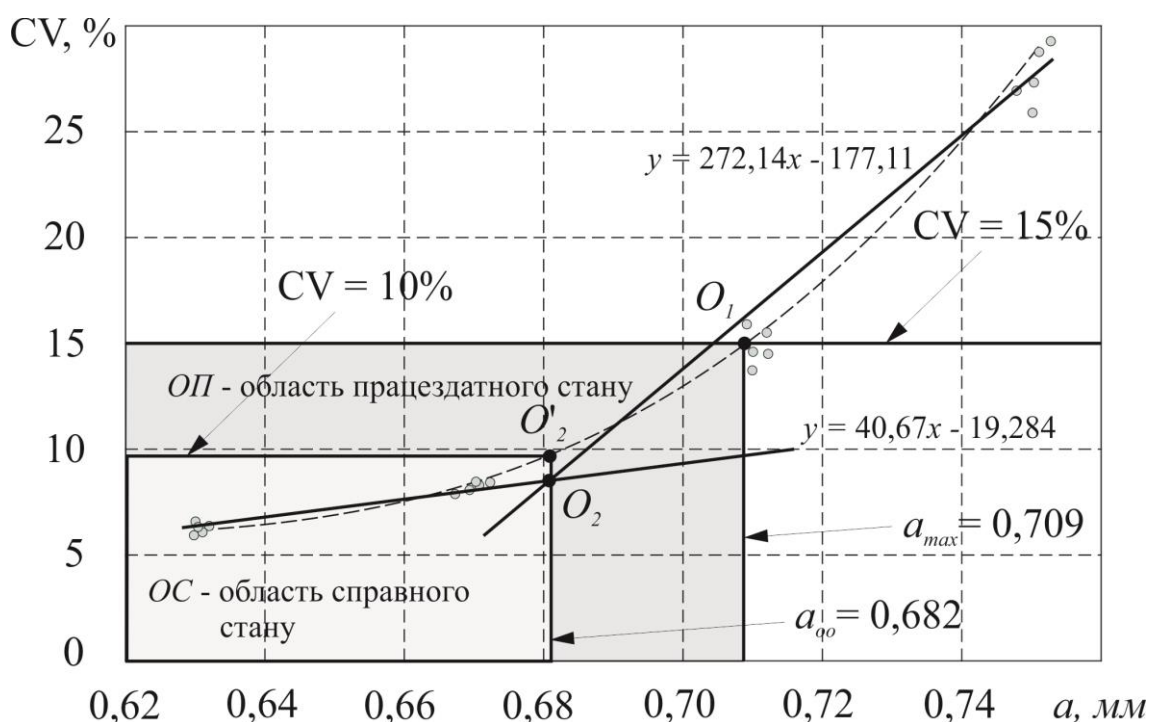


Рисунок 4.6 – Визначення області оптимальної роботи розпилювача

За результатами дослідження можна надати рекомендації для експлуатації розпилювачів. Оскільки значення $CV = 15\%$ є граничним, після якого подальша експлуатація розпилювача не дозволяється, то необхідно забезпечити поточне значення розміру a від 0,630 до 0,709 мм. Проте більш раціональним є забезпечення експлуатації розпилювача у межах області справного стану *ОС*, у якій збільшення ширини розпилювача впливає на

збільшення коефіцієнту варіації менш інтенсивно. Далі отримає наступні рекомендації:

1) якщо при діагностуванні розмір у центральному сегменті розпилювача знаходиться у межах 0,630 до 0,682 мм, що відповідає CV від 5 до 10 %, то розпилювач – придатний до подальшої роботи;

2) якщо при діагностуванні розмір у центральному сегменті розпилювача знаходиться у межах 0,682 до 0,709 мм, що відповідає CV від 10 до 15 %, то розпилювач – придатний, але потребує заміни у короткий термін, оскільки подальше збільшення CV має більш інтенсивний характер;

3) якщо при діагностуванні розмір у центральному сегменті розпилювача виходить за межі 0,709 мм, що відповідає CV понад 15 %, то розпилювач – непридатний та потребує невідкладної заміни.

Як показала серія дослідів [109-110], початкові розміри та коефіцієнт варіації навіть нових розпилювачів можуть відрізнятися, тому при експлуатації треба забезпечити знаходження параметрів розпилювача саме у області *ОС*, оскільки розпилювачі можуть мати дефекти виробництва, які призведуть до більш швидкого виходу на межу $CV = 10$ %. Додатково, забезпечення роботи розпилювачів у межах *ОС* дозволить підвищити якість виконання технологічної операції захисту рослин, через порівняно меншу нерівномірність розподілу робочої рідини по поверхні обробітку.

4.3 Перевірка адекватності методики прискореного аналізу характеру розподілу робочої рідини по поверхні обробітку

При порівнянні розподілу рідини при імітаційному моделюванні та експерименті (рис. 4.1-4.3) можемо констатувати, що для реальних розпилювачів симетрія відносно центральних вісей порушена та спостерігається більша нерівномірність розпилювання, ніж при моделюванні. Щодо осередків концентрації рідини (піків) вони ідентифікуються, але їх симетрія також порушена, тому перевірку адекватності методики прискореного

аналізу доцільно робити для половини поверхні обробітку та для трьох піків концентрації рідини за коефіцієнтом розподілу χ .

Окремі дослідження для отримання даних щодо розподілу рідини на $\frac{1}{2}$ поверхні обробітку не проводилися, вже відомий розподіл був розділений по осі b_2 ; b_1 (рис. 2.9). У результаті кожний розпилювач отримав два розподіли, для яких було розраховано коефіцієнт $CV_{iexp\frac{1}{2}}$, та на підставі його відхилення від результатів повного експерименту CV_{iexp} зроблено висновок щодо адекватності методики. Оскільки реальні дослідження не показують чіткої симетрії, то використання для розрахунку коефіцієнту розподілу χ рівнянь (2.102), (2.103) не має сенсу. Їх доцільно використовувати при імітаційному моделюванні, приводячи обчислення формування факелу до одного квадранту поверхні.

При експериментальних дослідженнях доцільно розглянути варіант з розрахунком коефіцієнту варіації на підстав трьох осередків концентрації рідини CV_{iexp3} рівняння (2.101). Попередній аналіз експериментального розподілу рідини показує наявність осередків концентрації, проте їх локалізація не співпадає з імітаційним моделюванням. Співпадає лише положення центрального осередку, а два бокові мають поперечне та поздовжнє зміщення відносно центральних осей. Як зазначалося у другому розділі це може бути наслідком неточності встановлення розпилювача по відношенню до поверхні обробітку або відмінністю реальної форми соплового отвору у порівнянні з моделлю через наявність незначних дефектів реальної поверхні.

Адекватність методики прискореного аналізу визначається на підставі розрахункового значення критерію Фішера та значення похибки (результати розрахунків наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахункова таблиця для перевірки адекватності методики прискореного аналізу

№	a_i , мм	Коефіцієнт варіації експ. CV_{iexp} , %	Коефіцієнт варіації експ. $\frac{1}{2}$ $CV_{iexp\frac{1}{2}}$, %	Похибка, $\varepsilon_i^{\frac{1}{2}}$, %	Коефіцієнт варіації експ. (3 піки) CV_{iexp3} , %	Похибка, ε_{i3} , %
1	0,63	6,26	6,05	5,0%	5,21	16,7%
2	0,64	6,36	6,12	2,2%	5,23	17,7%
3	0,65	6,50	6,27	3,4%	5,29	18,6%
4	0,66	7,07	6,51	7,9%	5,35	24,2%
5	0,67	7,98	7,65	4,2%	5,48	31,4%
6	0,68	9,23	8,80	4,7%	5,83	36,9%
7	0,69	10,82	10,26	5,3%	6,42	40,7%
8	0,7	12,75	12,02	5,8%	7,34	42,5%
9	0,71	15,02	14,09	6,2%	8,72	41,9%
10	0,72	17,63	16,46	6,6%	10,71	39,2%
11	0,73	20,57	18,14	11,8%	13,49	34,4%
12	0,74	23,85	21,13	11,4%	17,28	27,6%
13	0,75	27,47	24,96	9,1%	22,28	18,9%
Середня похибка, ε_m , %			6,4%		30,1%	
Максимальна похибка ε_{max} , %			11,8%		42,5%	
F -критерій			101,85		6,33	

З аналізу табл. 4.3 можна дійти висновку, що за критерієм Фішера обидві методики є статистично значимі на рівні значимості 0,05, оскільки розрахунковий F -критерій більший за $F_{кр} = 4,1$, проте значення похибки для методики аналізу осередків концентрації рідини значно перевищує допустимі значення (середня похибка ε_m становить 30,1 %, а максимальна $\varepsilon_{max} = 42,5$ %). Ця методика, з певним наближенням, придатна для визначення характеру зміни CV, а не його точного розрахунку.

Аналіз розподілу рідини на $\frac{1}{2}$ поверхні обробітку теж має перевищення похибки, але це перевищення фіксується у зоні значень коефіцієнту варіації вищих за гранично допустимі ($CV = 15\%$), як наслідок, не впливає на прийняття рішення щодо придатності розпилювача. Результати розрахунку CV за цією

методикою прискореного аналізу є підставою для визначення області у якій експлуатується розпилювач (рис. 4.6).

Результати розрахунків коефіцієнту варіації за різними методиками наведені на (рис. 4.7).

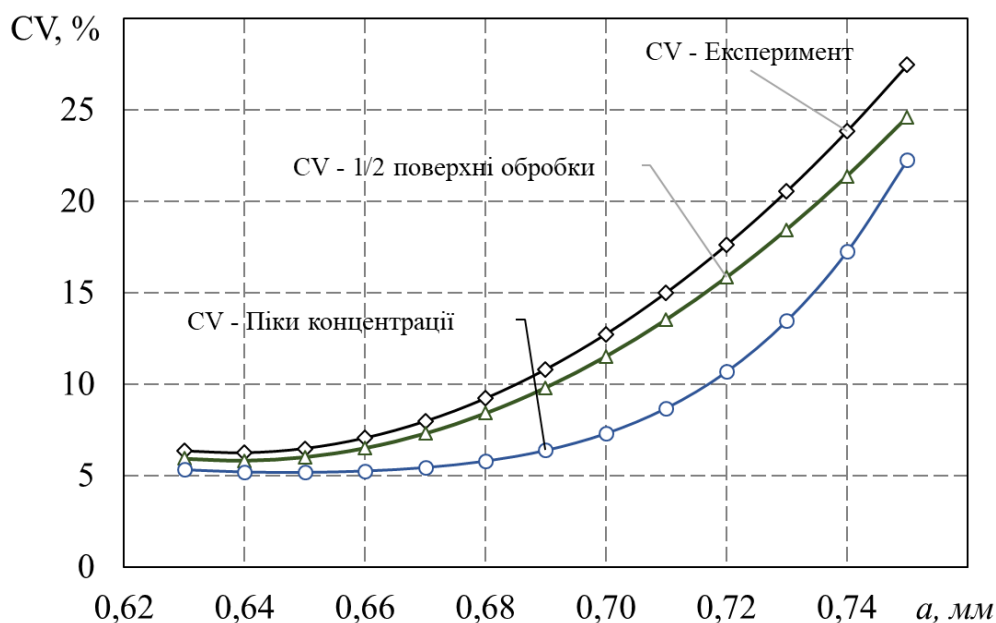


Рисунок 4.7 – Залежність зміни коефіцієнта варіації CV розподілу рідини по поверхні обробітку розраховані за методиками прискореного аналізу

Бачимо, що розрахунок коефіцієнту варіації на підставі осередків концентрації рідини показує суттєві похибки, оскільки осередки концентрації при теоретичному та експериментальному дослідженні не співпадають. Цю методику можна використовувати для аналізу експерименту при визначенні дійсного положення осередків концентрації рідини, що можливо лише на підставі повного експерименту, тобто не виконує мету прискорених досліджень, оскільки потребує того ж часу, що і повний експеримент. Прискорення досліджень з використанням цього підходу можливо для серії розпилювачів з однаковими вихідними даними, так для першого розпилювача проводиться повний експеримент, на підставі якого визначаються положення осередків, а для наступних проводиться прискорений дослід.

Оскільки найбільша частина часу експериментального дослідження витрачається на зважування пробірок з рідиною, то методика аналізу розподілу

рідини на $\frac{1}{2}$ поверхні обробітку показала доцільність її використання, як за статистичною оцінкою, так і за часом досліду. Тому має сенс її використання при проведенні подібних досліджень.

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

4.4 Результати польових дослідження самохідного обприскувача Case IH Patriot 3330, який обладнано щілинними розпилювачами

При аналізі джерел інформації у першому розділі виявлено, що більшість науковців при дослідженні розпилювачів обґрунтовують доцільність проведення лабораторних або стендових експериментів, як найбільш доцільних для вивчення якості розпилення. Відповідне базується на тому, що в реальних польових умовах наявні фактори (вологість, температура, швидкість та напрямок вітру тощо), які мають випадковий характер, і можуть змінюватися під час проведення експерименту. Тому для забезпечення можливості відтворення умов проведення експерименту дослідження якості розпилення необхідно проводити у лабораторних умовах. В даному дослідженні польові експерименти проведені виключно для підтвердження загальних тенденцій, отриманих при імітаційному моделюванні та лабораторних дослідженнях, оскільки умови проведення мають суттєві відмінності. В польових дослідженнях ставиться задача перевірити висновки щодо можливості використання розпилювачів з різних розмірних груп за показником якості розпилення. Об'єктом польових досліджень є обприскувач Case IH Patriot 3330 (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Обприскувач Case IH Patriot 3330

При проведенні польових досліджень використовувались методика оцінки якості обприскування в сільському господарстві за допомогою водочутливого паперу (компанія Syngenta), зокрема, Syngenta Water-Sensitive Paper [111]. Данна методика базується на використанні водочутливого паперу (Water-Sensitive Paper) (рис. 4.9). Цей папір має властивість змінювати колір на темно-синій при контакті з краплями води або робочого розчину.

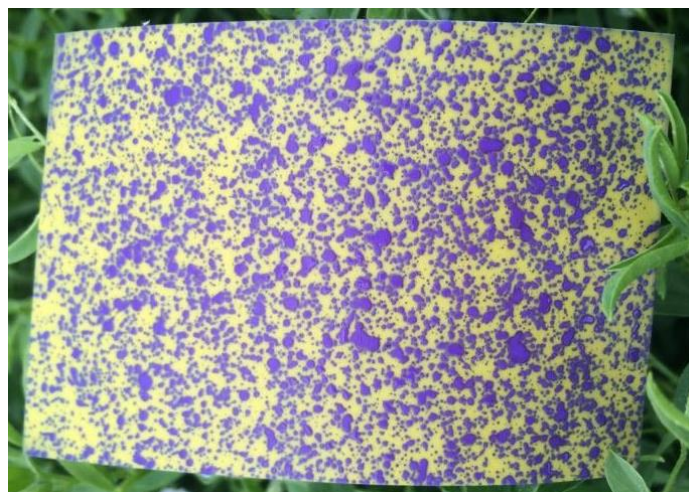


Рисунок 4.9 – Загальний вигляд водочутливого паперу

Відповідний метод був розроблений компанією Syngenta [95], і є світовим стандартом у сільському господарстві для швидкої польової оцінки якості розпилення (Spray Quality Assessment). Проте, потрібно враховувати, що реальні

робочі умови мають відмінність від лабораторних через вітер, швидкість руху трактора, архітектуру рослини, відповідно, спотворює факел розпилення. Водочутливий папір фіксує реальне осідання крапель у момент проходження обприскувача. Тому можна стверджувати, що це є експрес-метод визначення якості обприскування, який дає змогу зробити висновок щодо придатності використання розпилювачів з різних розмірних груп. При роботі з водочутливим папером потрібно унеможливити потрапляння сторонньої вологи, оскільки папір реагує навіть на вологу від пальців чи високу вологість повітря.

У відповідності до методики компанії Syngenta допускається проведення дослідження при заповненні баку чистою водою, що відповідає лабораторним дослідженням. Для визначення якості розпилення на штангу розпилювача було встановлено по п'ять розпилювачів кожної розмірної групи (розділ 3, табл. 3.3), далі по ширині штанги, відповідно до ширини захвату кожної розмірної групи (2,5 м) були закріплені картки водочутливого паперу з кроком 25 см безпосередньо на ґрунті (рис. 4.10).

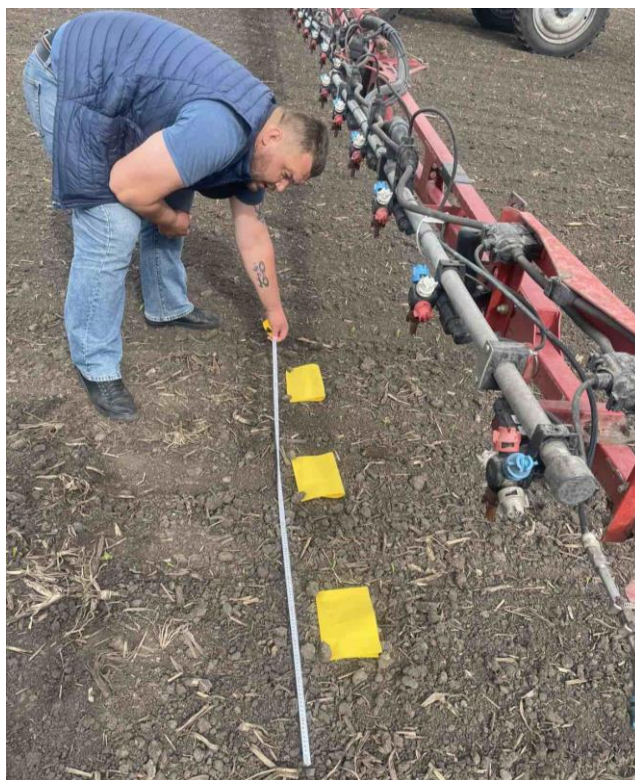


Рисунок 4.10 – Розміщення карток водочутливого паперу на ґрунті

Порядок проведення досліду:

1. На обприскувачі встановлені робочий тиск, висота штанги та норму виливу (л/га). Оскільки, в умовах лабораторних досліджень визначався розподіл робочої рідини по поверхні обробітку на відстані 500 мм від розпилювача, відповідна відстань була встановлена і при польових дослідженнях (рис. 4.11).



Рисунок 4.11 – Встановлення технологічних параметрів обприскування

2. Обприскувач Case IH Patriot 3330 виводиться на робочу швидкість 10 км/год на відстані 20 метрів до розкладених карток та проводиться обприскування.

3. Через 2 хвилини після проходження обприскувача картки були зібрані за сухі краї за допомогою пінцету. Часова затримка потрібна для повного висихання крапель на картках.

При подальшій обробці результатів обов'язково враховують фактор розтікання (Spread Factor) – пляма на водочутливому папері завжди більша за реальний розмір краплі у повітрі. Коли крапля стикається з папером, вона розплющується. Розмір синьої плями зазвичай у 1,5-3 рази більший за діаметр самої краплі.

Оцінка якості обприскування проводиться за трьома параметрами: густина, розмір плями та рівномірність. Її виконують з використанням

смартфона та спеціалізованого програмного забезпечення: DropScore / DropVision, яке дозволяє детально аналізувати спектр розміру крапель та робити аналіз рівномірності. Отримані результати розподілу крапель було порівняно з еталонними норми покриття для основних груп робочих розчинів пестицидів (стандарти компанії Syngenta табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Еталонні норми покриття (Стандарти Syngenta) [112]

Тип пестициду	Вимоги до щільності покриття	Характер розпилу
Контактні препарати (фунгіциди, інсектициди)	50 – 70 крапель/см ²	Дрібнокраплинний, середньокраплинний розпил
Системні післясходові препарати (гербіциди, гліфосати)	20 – 30 крапель/см ²	Середній або крупний розмір краплі
Ґрунтові гербіциди	20 – 30 крапель/см ²	Використовується крупний розмір краплі

При порівнянні були обрані вимоги до щільності покриття, що висуваються для контактних препаратів (фунгіциди, інсектициди), оскільки в лабораторних умовах розглядався саме дрібнокраплинний та середньокраплинний розпил. Результати досліджень показують, що розпилювачі I та II групи (ширина соплового отвору від 0,62 мм до 0,7 мм) повністю задовольняють вимогам еталонних норм покриття. Для III групи наявні відхилення від еталону у бік збільшення розмірів краплі та зменшення їх кількості на см². Наявні картки, де кількість крапель не перевищує 40 крапель/см², що є неприйнятним результатом. Для IV групи тенденція погіршується – зафіксовані повністю сині картки, що демонструє перевитрату робочої рідини під центром розпилювача та у місцях накладання піків нерівномірності, на інших картках наявна недостатня кількість крапель, що унеможлиблює використання цих розпилювачів, навіть для ґрунтових гербіцидів. Картки IV групи мають щільність покриття меншу за 20 крапель/см². Результати польових експериментів підтверджують загальні рекомендації щодо придатності щілинних розпилювачів при зміні лінійного

розміру соплового отвору a від 0,630 до 0,709 мм, подальше збільшення якого через зношення чи некоректну експлуатацію веде до суттєвого погіршення якості обприскування і вимагає термінової заміни розпилювача.

4.5 Висновки по розділу

1. Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити емпіричні зав'язки між характером розподілу робочої рідини по поверхні обробітку при зміні геометрії соплового отвору розпилювача. Для апроксимації експериментальних результатів, на підставі порівняння регресійних моделей, обґрунтовано квадратичну модель, оскільки вона має більший коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9938$ та менші похибки.

2. Перевірка адекватності математичної моделі роботи щілинного розпилювача проводилася з використанням критерію Фішера – модель є статистично значима на рівні значимості 0,05. Середня похибка моделювання ε_m становить 8,8 %, а максимальна $\varepsilon_{max} = 10,5$ %. Для зменшення максимальної похибки запропоновано використання емпіричного коефіцієнту δ_{im} .

3. Методики прискореного аналізу є статистично значимі, проте значення похибки для методики аналізу осередків концентрації рідини значно перевищує допустимі значення (середня похибка $\varepsilon_m = 30,1$ %, а максимальна $\varepsilon_{max} = 42,5$ %), тому її практичне використання не рекомендовано. Методика аналізу розподілу рідини на $\frac{1}{2}$ поверхні обробітку показала доцільність її використанні, як за статистичною оцінкою, так і за часом дослідів, тому є сенс її використання при проведенні подібних досліджень.

4. Отримані експериментальні результати дозволяють уточнити межі області працездатного стану ОП ($CV = 15\%$; $a_{max} = 0,709$ мм) та обґрунтувати область справного стану розпилювача ОС у межі ($CV = 10\%$; $a_{max} = 0,682$ мм). На підставі отриманих даних розроблено рекомендації для експлуатації розпилювачів: придатний ($a = 0,630 - 0,682$ мм); придатний, з заміною у короткий термін ($a = 0,682 - 0,709$ мм); не придатний ($a > 0,709$ мм). Отримані

рекомендації перевірені під час польових досліджень самохідного обприскувача Case IH серії Patriot 3330, де було підтверджено, що розпилювачі I та II групи (ширина соплового отвору від 0,62 мм до 0,7 мм) повністю задовольняють вимогам еталонних норм покриття, а використання розпилювачів III і IV груп веде до суттєвого погіршення якості обприскування і вимагає термінової заміни розпилювачів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень зроблено наступні висновки:

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

2. За результатами теоретичних досліджень:

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

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Експлуатація машин і обладнання. Навчальний посібник : Каталог сільськогосподарської техніки / О. В. Нанка та ін. ; за ред. В. І. Мельника. Харків : ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 594 с.
2. Експлуатація та сервіс техніки. Обприскувачі та машини для внесення добрив : навч. посіб. / **К. Г. Сировицький**, С. О. Харченко, О. І. Анікеєв, М. Л. Шуляк, В. М. Зубко, Л. М. Батюк ; за ред. С. О. Харченка. Харків, 2024. 134 с.
3. TeeJet – AIXR (Каталог/паспорт). URL: <https://www.teejet.com>
4. Pentair Hypro – ULD / ULDM (Datasheet). URL: <https://www.pentair.com/hypro.html>
5. Lechler – ID3 (Datasheet / каталог). URL: <https://www.lechler.com>
6. Albuz – ADI (Ceramic AI Nozzles). URL: <https://www.albuz.com>
7. ARAG – TFA twin fan air (Datasheet). URL: <https://www.aragnet.com>
8. Lechler – FS Multi-jet fertilizer nozzles. URL: <https://www.lechler.com>
9. TeeJet – TTI Turbo TeeJet Induction (Datasheet). URL: <https://www.teejet.com>
10. TeeJet – TXVK / ConeJet (Hollow cone) (Catalog page). URL: <https://www.teejet.com>
11. TeeJet – StreamJet SJ3 / SJ7 (Fertilizer stream nozzles). URL: <https://www.teejet.com>
12. Мельник В. І., **Сировицький К. Г.** Розпилювачі для хімічного захисту рослин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Вип. 135: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2013. С. 95–101.
13. Мельник В. І., **Сировицький К. Г.**, Фатєєва Н. Ю. Аналіз конструкцій розпилювачів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. Вип. 199. С. 359–365.

14. ASABE S572.1: Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra (загальні принципи класів крапель). Довідкові матеріали: UNL CropWatch. 2019.
15. Butts T. R. et al. Droplet size and nozzle tip pressure from a PWM system. *Transactions of the ASABE*. 2019. Vol. 62, No. 6. Pp. 1500–1510.
16. ДСТУ EN ISO 16119-1:2014 Машини для сільського та лісового господарства. Екологічні вимоги до обприскувачів. Частина 1. Загальні положення (EN ISO 16119-1:2013, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=85418
17. Pesticide Stewardship: Understanding Droplet Size. URL: <https://pesticidestewardship.org/pesticide-drift/understanding-droplet-size/>
18. European Commission: SPISE materials on inspection of sprayers in Europe, 2017.
19. Fabula J. et al. Nozzle pressure uniformity and expected droplet size of a PWM sprayer. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 180. Art. 105910.
20. García-Munguía A. et al. Review of Drone Technology and Operation Processes for Crop Spraying. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. Art. 674.
21. ISO 10625:2018 / ДСТУ ISO 10625:2019. Equipment for crop protection – Colour coding for identifying nozzles. URL: <https://www.iso.org/standard/69217.html>
22. ISO 5682-2:2017. Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 2: Test methods to assess the horizontal transverse distribution for hydraulic sprayers. URL: <https://www.iso.org/standard/60054.html>
23. Slocombe J. W., Sharda A. Agricultural Spray Nozzles: Selection and Sizing (MF3178). Kansas State University. 2015. URL: https://bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/agricultural-spray-nozzles-selection-and-sizing_MF3178.pdf
24. University of Nebraska–Lincoln. Nozzles – Selection and Sizing (EC141). 2019. URL: <https://extensionpubs.unl.edu/publication/ec141/na/pdf/view>

25. Chethan C. R., Singh P. K., Dubey R. P., Chander S., Ghosh D. Herbicide Application Methodologies. *Innovative Farming*. 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/341568093>
26. Purdue University Extension. Agricultural Spray Nozzles: A Comprehensive Review (PPP-153). 2021. URL: <https://ag.purdue.edu/departments/extension/ppp/resources/ppp-publications/mobile/ppp-153/agricultural-spray-nozzles-a-comprehensive-review.html>
27. Virginia Cooperative Extension. Nozzles: Selection and Sizing (442-032). 2018. URL: https://vtp.p.ento.vt.edu/content/dam/vtp.p_ento_vt_edu/publications/NozzlesSelectionAndSizing.pdf
28. NDSU Extension. Spray Equipment and Calibration. 2018. URL: <https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/spray-equipment-and-calibration>
29. ANSI/ASABE S572.3 (2020). Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=51101>
30. ISO 22866:2005. Equipment for crop protection – Methods for field measurement of spray drift. URL: <https://www.iso.org/standard/35161.html>
31. ISO 16122-1:2015 / 2024 (parts 2–5). Agricultural and forestry machinery – Inspection of sprayers in use. URL: <https://www.iso.org/standard/56721.html>
32. OECD Standard Codes for the Official Testing of Pesticide Application Equipment (Field Crop Sprayers). URL: <https://www.oecd.org/agriculture/topics/standard-codes-pesticide-application/>
33. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0128>
34. ANSI/ASABE S572.3 (2020). Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=51101>

35. ISO 22866:2005. Equipment for crop protection – Methods for field measurement of spray drift. URL: <https://www.iso.org/standard/35161.html>
36. ISO 16122-1:2015 / 2024. Agricultural and forestry machinery – Inspection of sprayers in use – Part 1: General. URL: <https://www.iso.org/standard/56721.html>
37. FAO. Guidelines on Good Practice for Ground Application of Pesticides. URL: https://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests_Pesticides/Code/Old_guidelines/Ground_application.pdf
38. Spraying Systems Co. Technical Reference: Nozzle wear. URL: https://www.spray.com/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/catalog/cat75hyd_us_tech-reference_a.pdf
39. University of Kentucky. AEN-170: When to Replace Sprayer Nozzle Tips. URL: <https://publications.mgcafe.uky.edu/sites/publications.ca.uky.edu/files/AEN170.pdf>
40. Modeling of Diesel Spray Atomization Linked with Internal Nozzle Flow / M. Nagaoka, R. Ueda, R. Masuda, E. von Berg, R. Tatschl. *R&D Review of Toyota CRDL*. 2011. Vol. 42, No. 2. Pp. 73–84. URL: https://www.tytlabs.co.jp/en/review/rev422epdf/422_073nagaoka.pdf
41. CD-adapco. STAR-CCM+ User Guide Version 13.04. New York : CD-Adapco, 2019.
42. Rayleigh L. On the Instability of Jets. *Proceedings of the London Mathematical Society*. 1878. Vol. 10. Pp. 4–13.
43. Sterling A. M., Sleicher C. A. The instability of capillary jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 1975.
44. Lin S., Reitz R. Drop and Spray Formation from a Liquid Jet. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 30. Pp. 85–105.
45. Reitz R. D. Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays. *Atomisation and Spray Technology*. 1987. Vol. 3. Pp. 309–337.

46. Som S. et al. Effects of primary breakup modeling on spray and combustion. *Combustion and Flame*. 2010.
47. Beale J. C., Reitz R. D. Modeling spray atomization with the KH-RT hybrid model. *Atomization and Sprays*. 1999.
48. Turner M. R. et al. A breakup model for transient Diesel fuel sprays. *Fuel*. 2012.
49. Williams F. A. Spray equation // *Combustion Theory*. Taylor & Francis, 2018.
50. Marchisio D., Fox R. Solution of PBEs using DQMOM. *Journal of Aerosol Science*. 2005.
51. Magnotti G. M. et al. Detailed assessment of diesel spray atomization models. *Fuel*. 2017.
52. Helldorff H. Primary and Secondary Spray Breakup Modelling. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*. 2019.
53. Lasheras J., Hopfinger E. Liquid Jet Instability and Atomization in a Coaxial Gas Stream. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2000.
54. Im K.-S. Breakup modeling of a liquid jet in cross flow. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2011.
55. Lefebvre A. H., McDonnell V. Atomization and Sprays. CRC Press, 2017.
56. Chen L. SMD model at atmospheric pressure using DoE. *Fuel*. 2015.
57. Popinet S. et al. Primary atomization with AMR+VOF. *International Journal of Multiphase Flow*. 2009.
58. Rogers B. et al. SPH for free-surface flows. 2016.
59. Villermaux E., Marmottant P., Duplat J. Ligament-mediated spray formation. *Physical Review Letters*. 2004.
60. Marmottant P., Villermaux E. Fragmentation of stretched liquid ligaments. *Physics of Fluids*. 2004.
61. Bremond N., Villermaux E. Atomization by jet impact. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006.

62. De Cock N. et al. Optical measurement of spray characteristics using PDPA and shadowgraphy. *Agriculture*. 2021.
63. Mirjalili S. et al. Interface-capturing methods review. 2017.
64. Nielsen A. H. DQMOM for sprays. *Proceedings of ILASS–Europe*. 2010.
65. Marchisio D., Fox R. QMOM for aggregation–breakage. *AIChE Journal*. 2003.
66. Marchisio D. L., Fox R. O. Computational Models for Polydisperse Particulate and Multiphase Systems. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. 434 p.
67. Yan J., Wang J., Lv C., Wang S. A CFD simulation method for nozzle droplet deposition characteristics and corresponding experimental validation. *Journal of Agricultural Engineering*. 2025. Vol. 56, No. 1. Art. 1708. DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2025.1708>
68. Karpiński P., Hołownicka A., Subrizi F. et al. Numerical Modelling of the Multiphase Flow in an Agricultural Hollow Cone Nozzle. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 13. Art. 7214. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15137214>
69. Deng W., Zhao C., Chen L., Zhang R. Simulation and Experiment of a Designed Anti-Drift Spray Nozzle. *Advances in Animal Biosciences*. 2017. Vol. 8, No. 2. Pp. 837–841. DOI: <https://doi.org/10.1017/s2040470017001340>
70. Zhao Y., Li X., Wang G. Mini-review: air-assisted spray nozzles and applications. *Frontiers in Physics*. 2025. Vol. 13. Art. 1705908. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2025.1705908>
71. Tryggvason G. et al. A Front-Tracking Method for computations of multiphase flows. *Journal of Computational Physics*. 2001.
72. Мельник В. І. Внутрішньогрунтове внесення рідин в рослинництві : монографія. Харків : Міськдрук, 2010. 439 с.
73. Кобець А. С., Кобець О. М., Ільницький В. М. Діагностування технічного стану щілинних розпилювачів пестицидів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Вип. 134: Технічний сервіс машин для рослинництва*. 2013. С. 7–11.

74. Погорілий В. В., Войновський В. В., Войновська А. С., Філатова Л. І. Тенденції розвитку та класифікація самохідних обприскувачів. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України* : зб. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2015. Вип. 19. С. 353–355.
75. Барановський В. М., Пономаренко Н. В., Панченко А. М. Обґрунтування параметрів роботи штангових обприскувачів з інжекторними розпилювачами. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2018. Вип. 22. С. 114–122.
76. Войтовський В. В., Войтовська А. С. Дослідження впливу фізико-хімічних властивостей робочих розчинів на дисперсність розпилу гідравлічних форсунок. *Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*. 2019. Вип. 24. С. 89–95.
77. Кобець О. М. Обґрунтування параметрів робочого процесу комбінованого стенда для оцінки якості роботи розпилювачів пестицидів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47. С. 102–109.
78. Лисак В. П., Марченко О. В., Куценко А. Г. Математичне моделювання руху газорідного струменя в інжекторних розпилювачах сільськогосподарського призначення. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2020. Т. 11, № 2. С. 45–53.
79. Михайлов П. М., Скорук М. П., Федоренко Д. І. Вплив пульсацій тиску в напірній магістралі обприскувача на рівномірність патерну розпилу щілинних форсунок. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2022. Вип. 22, т. 1. С. 74–82.
80. Степаненко С. П., Цуркан О. В. Експериментальний стенд для динамічного експрес-контролю витрати рідини через сопла розпилювачів

польових обприскувачів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. 10 (109). С. 210–217.

81. Левицький Б. Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів для диференційованого внесення рідких мінеральних добрив : дис. ... доктора філос. (PhD) : спец. 133 «Галузеве машинобудування». Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2025. 214 с.

82. Розпилювачі для сільського господарства : каталог L 2010 / Lechler. Metzingen : Lechler GmbH. 68 с.

83. TeeJet technologies. 51. Каталог. Спреінг Системс Ко, 2011. 148 с.

84. Піддубний С. В., Просяний К. В., Кобець О. М. Результати дослідження розпилювачів пестицидів. *Матеріали Міжнародної студентської науково-практичної конференції «Перспективи розвитку аграрної вищої освіти України очима молодих науковців»* : зб. наук. пр. Ніжин, 2013. С. 81–84.

85. Кобець О. М., Пугач А. М., Кузьменко О. Ф. Стенд для дослідження розпилюючих пристроїв машин для внесення агрохімікатів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Вип. 190. Харків, 2018. С. 52–57.

86. Fritz B. K., Hoffmann W. C. Procedures for droplet-size measurement of agricultural sprays using laser diffraction. *Transactions of the ASABE*. 2016.

87. Privitera D. et al. Spray visualization and flow analysis using PIV/PLIF. *Scientific Reports*. 2023.

88. AeroExpo. Laboratory equipment catalogue: Nozzle wear test benches. 2022.

89. Ільїн В. А., Позняк Е. Г. Аналітична геометрія : посібник для університетів. Наука : Наука, 1988. 224 с.

90. Марчук Г. І. Методи обчислюваної математики : навчальний посібник. Наука : Наука, 1989. 608 с.

91. Зав'ялов Ю. С., Квасов В. І., Мірошніченко В. Л. Методи сплайн-функцій. Наука : Наука, 1980. 352 с.

92. Абрамович Г. Н. Прикладна газова динаміка. Наука : Держтехтеорвидат, 1953. 736 с.

93. Абрамович Г. Н. Теорія відцентрового розпилювача. *Промислова аеродинаміка*. 1944. С. 82–88.
94. Хогланд Ж. Ракетна техніка. 1962. № 5. С. 3–16.
95. Карлсон Е., Хогланд Ж. Опір і тепловіддача частинок в соплах ракетних двигунів. *Ракетна техніка і космонавтика*. 1964. № 11. С. 104–109.
96. Стекольщиков А. М. та ін. Інженерно-фізичний журнал. 1972. Т. 23, № 2. С. 226.
97. Салтанов Г. А. Надзвукові двофазні течії. Наука : Наука, 1972. 476 с.
98. Раушенбах Б. В. та ін. Фізичні основи робочого процесу в камерах згоряння повітряно-реактивних двигунів. Наука : Машинобудування, 1964. 526 с.
99. Галустов В. С. та ін. До вибору рівняння для розрахунку коефіцієнту опору в моделях динаміки дисперсних систем. Наука, 1980. № 551-ХІІ. С. 9-17.
100. Ревкінд В. Я., Рискін Г. М. Механіка рідини і газу. 1976. № 1. С. 218.
101. **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л., Зубко В. М., Панкова О. В. Обґрунтування гідродинаміки факела розпилю щілинної гідравлічної форсунки. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми : Вид-во СНАУ, 2025. Вип. 3 (61). С. 142–150. DOI: <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.3.20>
102. Tryggvason G., Scardovelli R., Zaleski S. Direct numerical simulations of gas-liquid multiphase flows. Cambridge : Cambridge University Press, 2011.
103. **Сировицький К. Г.** Імітаційне моделювання розподілу робочої рідини в об'ємі факелу розпилювання щілинної форсунки. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми : Вид-во СНАУ, 2026. Вип. 2 (64). С. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.32782/msnau.2026.2.18>
104. Wendt J. F. Computational Fluid Dynamics: An Introduction. Berlin : Springer Science & Business Media, 2008.
105. Інструкція з експлуатації універсального вимірювального мікроскопа УІМ-21.1982. 40 с.
106. Roland EGX-400 User's manual. Roland DG Corp., 2002. 149 p.

107. Патент на корисну модель № 153267 Україна, МПК A01B 39/26. Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин / Анікеєв О. І., Коробко А. І., Мельник В. І., Панкова О. В., **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л. ; заявник і патентовласник Державна наукова установа «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого». № u202201854 ; заявл. 31.05.2022 ; опубл. 14.06.2023, Бюл. № 24/2023.

108. Мельник В. І., **Сировицький К. Г.**, Шуляк М. Л., Панкова О. В. Методика проведення експериментальних досліджень технічного стану щілинних гідравлічних розпилювачів самохідних обприскувачів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Харків : Вид-во ХПІ, 2021. Вип. 1. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.1.07>

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

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

111. Syngenta Canada. Water Sensitive Paper. Syngenta Canada: Agronomy. URL: <https://www.syngenta.ca/agronomy/water-sensitive-paper>

112. Water-sensitive paper for monitoring spray distribution. Syngenta Crop Protection AG. URL: https://aws.agroconsultasonline.com.ar/ticket.html/Water%20Sensitive%20Paper%20Syngenta%20Agro.pdf?op=d&ticket_id=2388&evento_id=4891

ДОДАТКИ

Додаток А

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової та міжнародної діяльності СНАУ, д.с.н., професор

Данько Ю.І.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор СТОВ «Промінь»

Коваленко Є.М.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Відповідно до програми спільної науково-дослідної роботи між СНАУ та СТОВ «Промінь» (ГДТ № 6-11 від 10 листопада 2023 р.) було випробувано методику і метод діагностування щілинних гідравлічних форсунок для внесення засобів захисту рослин згідно з результатами досліджень Сировицького К.Г.

На СТОВ «Промінь» Сумського району Сумської області в умовах довготривалої експлуатації на протязі 2023-2024 рр. були проведені виробничі випробування.

До програми випробувань входило використання методів і методики діагностування відбракування щілинних гідравлічних форсунок, встановлення залежностей технічного стану соплового отвору щілинної гідравлічної форсунки на якість та ефективність виконання технологічної операції внесення засобів захисту рослин.

Дослідження виконувались на самохідних та причіпних штангових оприскувачах і агродронах.

В результаті досліджень встановлено:

- збільшення ефективності використання машин для виконання технологічної операції внесення засобів захисту рослин на 11%;
- збільшення коефіцієнту технічної готовності машин для виконання технологічної операції внесення засобів захисту рослин на 15%;
- зниження витрат робочої рідини на 10-12%.

Річний економічний ефект від застосування методики і методів діагностування щілинних гідравлічних форсунок для внесення засобів захисту рослин за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав 120,0 тис. грн.

Від СНАУ

Науковий керівник, д.т.н., професор

Шуляк М.Л.

Відповідальний виконавець

Сировицький К.Г.

Від СТОВ «Промінь»

Директор

Коваленко Є.М.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(СНАУ)

вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, тел. + 38 (0542) 70 10 10, факс: +38 (0542) 70 10 55
e-mail: admin@snau.edu.ua, https://snau.edu.ua
Код ЄДРПОУ 04718013

29 08 2025 № 181 На № _____ від _____

Довідка

про впровадження результатів наукових досліджень
Сировицького Кирила Геннадійовича
у навчальний процес Сумського національного аграрного університету

Видана в тому, що результати наукових досліджень Сировицького Кирила Геннадійовича, старшого викладача кафедри агроінжинірингу за темою завершених дисертаційних досліджень використовуються в навчальному процесі при викладанні дисциплін «Експлуатація машин і обладнання», «Сільськогосподарські машини», «Гідро-, пневмо- електросистеми агромашин», «Теорія і технологія наукових досліджень» в Сумському національному аграрному університеті для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського), другого (магістерського) та третього (освітньо-наукового) ступеня вищої освіти інженерно-технологічного факультету спеціальностей 208 Агроінженерія, Н7 Агроінженерія, 133 Галузеве машинобудування та G11 Галузеве машинобудування.

Проректор з наукової та
міжнародної діяльності




Юрій ДАНЬКО

Додаток В

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової та міжнародної
діяльності СНАУ, д.е.н., професор
Данько Ю.І.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова ФГ "РЕЇНЦІ"

Мудрий В.В.



АКТ

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Відповідно до програми спільної науково-дослідної роботи між СНАУ та ФГ "РЕЇНЦІ" було апробовано науково-обґрунтовані методи для діагностики щілинних форсунок для захисту рослин згідно з результатами досліджень Сировицького К.Г.

В умовах ФГ "РЕЇНЦІ" Миколаївської області під час експлуатації сільськогосподарських оприскувачів на протязі 2024 року було проведено виробничі випробування запропонованих методів.

Згідно з рекомендацій використання методів було проведено первинну діагностику технічного стану щілинних форсунок та оцінку стану сопла форсунок. Отримані дані дозволили визначити поточний стан ефективності роботи форсунок та проаналізувати якість виконання технологічної операції внесення засобів захисту рослин. Випробування виконувались на самохідних оприскувачах.

В результаті випробувань встановлено:

- пряму залежність технічного стану (соплового отвору) щілинних форсунок на якість розподілу рідини по поверхні;
- підвищення ефективності підготовки до роботи оприскувачів та їхнього коефіцієнту готовності на 12%;
- зниження витрат розчинів на 10%;
- підвищення врожайності сільськогосподарських культур на 6%.

Річний економічний ефект впровадження методів для діагностики щілинних форсунок для захисту рослин склав 98,0 тис. грн.

Від СНАУ

Науковий керівник, д.т.н., професор

Шуляк М.Л.

Відповідальний виконавець

Сировицький К.Г.

Від ФГ "РЕЇНЦІ"

Голова ФГ

Мудрий В. В.



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«СІ-ЕН-ЕЙЧ ІНДАСТРІАЛ УКРАЇНА»
(ТОВ «СІ-ЕН-ЕЙЧ ІНДАСТРІАЛ УКРАЇНА»)

Код ЄДРПОУ 44436714 вул.Лейпцизька, 15, м.Київ, 01015

Corporate Office
25 St. James's Street
London, SW1A 1HA
United Kingdom

**ТОВ "Сі-Ен-Ейч
Індастріал Україна"**
Поштова адреса
01015, місто Київ,
вул.Лейпцизька,15
Україна

Статутний капітал
30000000,00 грн.
(Тридцять мільйонів)
Код ЄДРПОУ 44436714
ІПН 444367126550

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової та міжнародної
діяльності СНАУ, д.е.н., професор



Данько Ю.І.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор ТОВ "Сі-Ен-
Ейч Індастріал Україна"



Мазаний М.В.

АКТ

**ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У
ВИРОБНИЧУ ДІЯЛЬНІСТЬ**

Відповідно до Меморандуму про співпрацю між СНАУ та ТОВ "Сі-Ен-Ейч Індастріал Україна" було використано результати досліджень для діагностування та оцінки рівня технічного стану та готовності до експлуатації щільних гідравлічних форсунок сільськогосподарських обприскувачів, згідно з методикою та методами Сировицького К.Г.

На базі ТОВ "Сі-Ен-Ейч Індастріал Україна" при виконанні передпродажного та післяпродажного супроводу та обслуговування сільськогосподарських обприскувачів протягом 2025 року були проведені виробничі випробування.

В методику входило використання запропонованих дій, методів і залежностей для оцінки стану соплового отвору щільних гідравлічних форсунок, використання залежностей технічного стану соплового отвору щільної гідравлічної форсунки на коефіцієнт придатності до роботи та якість і ефективність експлуатації.

Методика використовувалась для самохідних та причіпних обприскувачів. За аналізом результатів впровадженої методики було отримано наступне:

- зменшення часу на виконання діагностики та регламенту обслуговування сільськогосподарських обприскувачів на 12%;
- зниження загальних експлуатаційних витрат на 14%.

Річний економічний ефект за рахунок впровадження методики для діагностування та оцінки рівня технічного стану і готовності техніки склав 135,0 тис. грн.

Від СНАУ

Науковий керівник, д.т.н., професор

Шуляк М.Л.

Відповідальний виконавець

Сировицький К.Г.

Від ТОВ "Сі-Ен-Ейч Індастріал
Україна"

Генеральний директор



Мазаний М.В.



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 153267

(13) U

(51) МПК

A01B 39/26 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

- (21) Номер заявки: **u 2022 01854**
 (22) Дата подання заявки: **31.05.2022**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **15.06.2023**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **14.06.2023, Бюл.№ 24**

- (72) Винахідник(и):
Анікєєв Олександр Іванович (UA),
Коробко Андрій Іванович (UA),
Мельник Віктор Іванович (UA),
Панкова Оксана Володимирівна (UA),
Сировицький Кирило Геннадійович (UA),
Шуляк Михайло Леонідович (UA)
- (73) Володілець (володільці):
ДЕРЖАВНА НАУКОВА УСТАНОВА
"УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ
ІНСТИТУТ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА
ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО
ВИРОБНИЦТВА ІМЕНІ ЛЕОНІДА
ПОГОРІЛОГО",
 вул. Велика Панасівська, 236, м. Харків,
 61040 (UA),
Анікєєв Олександр Іванович,
 вул. Леся Сердюка, 14, кв. 98, м. Харків,
 61184 (UA),
Коробко Андрій Іванович,
 вул. Шкільна, 11, с. Красна Поляна,
 Зміївський р-н, Харківська обл., 63411 (UA),
Мельник Віктор Іванович,
 просп. Ювілейний, 59, кв. 239, м. Харків,
 61118 (UA),
Панкова Оксана Володимирівна,
 вул. Академіка Проскури, 10-а, кв. 78, м.
 Харків, 61070 (UA),
Сировицький Кирило Геннадійович,
 вул. Амосова, 9, кв. 76, м. Харків, 61171
 (UA),
Шуляк Михайло Леонідович,
 пров. Петшотравневий, 38, м. Харків, 61015
 (UA)

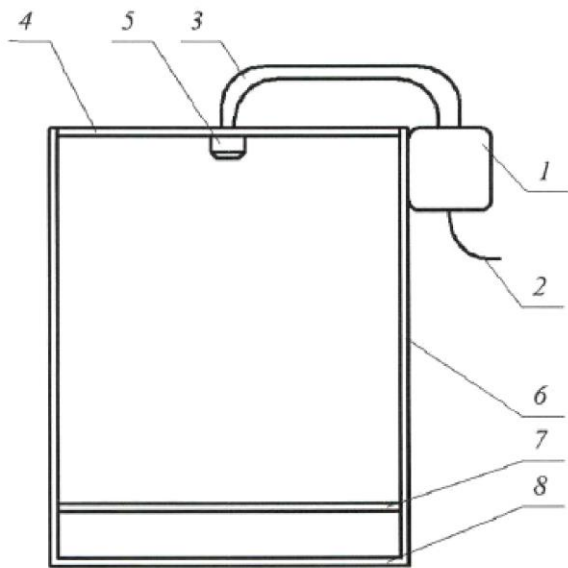
UA 153267 U

(54) СТЕНД ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОЗПИЛЮВАЧІВ ДЛЯ ХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ РОСЛИН

(57) Реферат:

Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин містить бачок для робочої рідини, корпус розпилювача, розпилювач. містить матриці для лабораторних пробірок, шаровий кран, компресор. Розпилювачі регулюються за висотою їх встановлення.

UA 153267 U



UA 153267 U

Корисна модель належить до галузі випробувального устаткування, а саме до стендів для перевірки технічного стану сопла форсунки, і може бути використана для випробувань розпилювачів.

Відомо стенд [А. С. СРСР № 1153187 МПК А23D 11/00] для випробування форсунок, який складається з прийомної камери з дослідним полем, в верхній частині якої розміщена досліджувана форсунка, а в нижній під факелом розпилу - пробовідбірники. При роботі стенда рідина, що розпилюється, подається в форсунку, яка утворює факел розпилу, який сприймається пробовідбірником.

Недоліком даного випробувального устаткування є те, що під час роботи не можливо оцінити якість плями розпилу робочої рідини форсункою. Крім цього, такий стенд є трудомістким у виготовленні та має недоліки щодо матеріалів, з яких він виконаний.

Відомо стенд [А. С. СРСР № 1523182 МПК А105В 12/08] для випробувань і регулювання розпилювачів, який має насос із забірною і нагнітальною магістралями, регулятор тиску, штангу, розпилювачі і засоби їх кріплення. При роботі стенда вмикають в роботу вакуумний насос, розрідження від якого при відкритому вентилі передається в порожнину кільцевої канавки і до отворів прокладки. За рахунок вакууму, що утворюється, гніздо розпилювача притягується до порожнини прокладки. Таким чином, поки система функціонує, вона забезпечує щільне прилягання.

Недоліком такого стенда є те, що під час його роботи не має можливості зняття двомірної характеристики розпилювача. Також відсутня можливість регулювання висоти встановлення розпилювача.

Найближчим аналогом є стенд для випробувань і регулювання розпилювачів [А. С. СРСР № 1657232], який має насос, забірну і нагнітальну магістралі, регулятор тиску з манометром, засіб для кріплення розпилювачів (виконаний у вигляді корпусу), джерело розрідження рідини у вигляді гідравлічного ежектора, вхід якого з'єднаний з нагнітальною магістраллю, а порожнина розрідження рідини з'єднана з кільцевими канавками корпусів засобів кріплення розпилювачів через двоходовий кран. В нижній частині резервуара (бачка для робочої рідини) розміщено фільтр.

Недоліком аналога є неможливість уточнення технічного стану сопла розпилювача та неможливість оцінити рівномірність розподілу робочої рідини по факелу розпилу.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення точності визначення характеру розподілу робочої рідини в плямі розпилювання з врахуванням відстані від розпилювача до поверхні ґрунту, що досягається за рахунок можливості імітації процесів, що відбуваються під час виконання технологічних операцій захисту рослин.

Поставлена задача вирішується тим, що стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин, що містить бачок для робочої рідини, корпус розпилювача, розпилювач, згідно з корисною моделлю, містить матриці для лабораторних пробірок шаровий кран, компресор, а розпилювачі регулюються за висотою їх встановлення.

Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин зображений на кресленні та містить бачок 1 для робочої рідини з заливною горловиною, шаровим краном і ніпелем з шлангом подачі повітря 2, який з'єднаний з компресором (на схемі не показаний), еластичний трубопровід 3, верхню балку 4 з вмонтованим корпусом розпилювача 5, стійку 6, матрицю верхню 7 та матрицю нижню 8, які мають в собі отвори діаметром 14 мм для тримання лабораторних пробірок (на схемі не показані). Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин виготовляється з матеріалів, які мають високу стійкість до корозії, а саме з капролону та органічного скла.

Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин працює наступним чином. В корпус розпилювача у верхній балці 4 монтується форсунка. У матриці 7 та 8 встановлюються лабораторні пробірки. В бачок 1 заливається робоча рідина через заливну горловину. Через з'єднаний з компресором шланг подачі повітря тиск в бачку доводиться до необхідного (2-5 атм). Після виходу тиску на необхідний рівень шаровий кран бачка 1 відкривають, внаслідок чого рідина через еластичний трубопровід 3 подається в корпус розпилювача форсунки. Під час початку вливу робочої рідини з сопла форсунки фіксується час тривалістю одна хвилина. Це час проведення дослідів. Після завершення дослідів шаровий кран бачка 1 закривають, а тиск спускають до атмосферного; форсунку демонтують. Кожну пробірку з рідиною зважують та записують результат. Після зважування всіх пробірок, застосовуючи авторське програмне забезпечення визначається характер розподілу робочої рідини в плямі розпилювання, шляхом інтерполяції, дані маси рідини в пробірках апроксимують та отримують кількісну характеристику розподілу в двомірному просторі. Аналізуючи характер розподілу рідини в плямі розпилу за показниками (продуктивність форсунки при визначеному тиску,

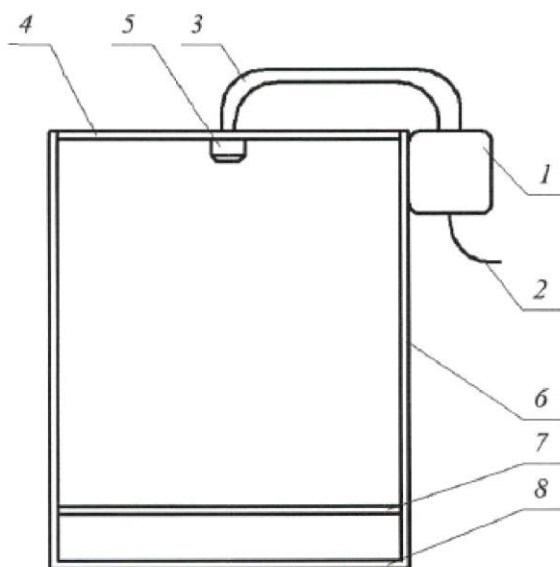
UA 153267 U

рівномірність розподілу рідини по поверхні плями розпилювання, висота встановлення форсунки над оброблювальною поверхнею), робиться висновок щодо форми сопла форсунки та якості розподілу робочої рідини поверхнею.

- 5 Запропонована корисна модель станда для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин, за допомогою якого є можливість підвищити точність визначення характеру розподілу робочої рідини в плямі розпилювання та продуктивність форсунки. Ці параметри дозволяють характеризувати технічний стан розпилювачів, які експлуатуються, та проводити вибраковування нових розпилювачів з виробничими дефектами.

10 ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 15 Стенд для діагностування технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин, що містить бачок для робочої рідини, корпус розпилювача, розпилювач, який **відрізняється** тим, що містить матриці для лабораторних пробірок, шаровий кран, компресор, а розпилювачі регулюються за висотою їх встановлення.



Комп'ютерна верстка О. Гергіль

ДО "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601