УДК 532.529.6:532.5.08
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).28

ELECTRICAL PULSE-COUNTING METHOD FOR DROPLET SIZE DISTRIBUTIONS FROM PRESSURE-SWIRL ATOMIZERS

ЛІЧИЛЬНО-ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОЇ СТРУКТУРИ КРАПЕЛЬНИХ ПОТОКІВ, СФОРМОВАНИХ ВІДЦЕНТРОВИМИ ФОРСУНКАМИ

Oleksandr R. Pereselkov
oleksandr.peresolkov@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9919-2951

Mykola P. Kundenko
Mykola.Kundenko@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5841-4367

Olga V. Krugliakova
Olha.Kruhliakova@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1113-826X

Yegor S. Demchuk
Yehor.Demchuk@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: 0009-0009-6311-2513

О. Р. Пересьолков,
канд. техн. наук, доцент

М. П. Кунденко,
докт. техн. наук, професор

О. В. Круглякова,
канд. техн. наук, доцент

Є. С. Демчук,
аспірант

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Abstract. Droplet size distribution governs heat and mass transfer intensity, interfacial area, and the performance of spray-type contact equipment. In dense sprays, optical diagnostics may be difficult, and contact-based techniques remain relevant. *Purpose*. To develop a methodology for applying an electrical pulse-counting method to determine local and overall characteristics of droplet flows generated by pressure-swirl atomizers. *Method*. The method records electrical pulses produced when a droplet of conductive liquid bridges two electrodes with variable tip spacing. The pulse-rate dependence on electrode spacing was described by a first-kind Volterra integral equation and reduced to an Abel-type equation. The experimental response was approximated by a one-parameter exponential function. Its parameter was used to determine the volume-based droplet size distribution, modal, median, and 95th-percentile diameters, specific interfacial area, and local volumetric liquid flux. Local distributions were combined into an overall spray distribution by weighting them with liquid flux over the spray cross-section. *Results*. A one-parameter representation of the droplet size distribution was obtained. Atomizers with one tangential inlet produced a non-uniform circumferential spray, whereas atomizers with two or more inlets generated an almost axisymmetric distribution. At the same pressure drop, the latter produced a 40–50 % greater specific droplet surface area. A dimensionless correlation relating the modal droplet diameter to liquid-film thickness and Reynolds number was obtained. *Scientific novelty*. A procedure was proposed for converting local measurements of droplet size distribution and liquid flux into a flux-weighted distribution representative of the spray cross-section. *Practical importance*. The methodology can be used to characterize droplet flows, compare atomizer designs, and select operating and geometric parameters for spray-type heat- and mass-transfer equipment.
Key words: electrical contact diagnostics; polydispersity; specific interfacial area; local liquid flux; circumferential non-uniformity; Reynolds number.

Анотація. Дисперсна структура краплинних потоків визначає загалом інтенсивність тепло- і масообміну, питому поверхню контакту фаз та ефективність розпилювальних апаратів. Для висококонцентрованих потоків оптичні методи обмежені, тому доцільні контактні вимірювання. *Мета*. Розроблення методики застосування лічильно-імпульсного методу для визначення локальних і узагальнених характеристик потоків відцентрових форсунок. *Методика*. Метод ґрунтується на реєстрації електричних імпульсів, що виникають за одночасного контакту краплі електропровідної рідини з двома електродами при змінній відстані між їх кінцями. Залежність частоти замикань описано інтегральним рівнянням Вольтерри першого роду, перетвореним до рівняння типу Абеля. Експериментальну залежність апроксимовано експоненціальною функцією, параметр якої використано для визначення розподілу об'єму крапель за діаметром, характерних діаметрів, питомої поверхні та локальної

питомої витрати. Локальні функції розподілу узагальнено шляхом зважування за питомою витратою в зонах перерізу факела. *Результати*. Встановлено можливість однопараметричного опису дисперсного складу потоку. Форсунки з одним підвідним каналом формують нерівномірний за колом факел, тоді як форсунки з двома і більше каналами забезпечують практично осесиметричний розподіл рідини. За однакового перепаду тиску питома поверхня крапель, утворених форсунками другого типу, була на 40–50 % більшою. Для цих форсунок одержано критеріальну залежність модального діаметра крапель від товщини рідинної плівки та числа Рейнольдса. *Наукова новизна*. Запропоновано спосіб переходу від локальних вимірювань дисперсного складу та питомої витрати до приведеної функції розподілу, що характеризує сукупність крапель у перерізі факела. *Практична значимість*. Методика може бути використана для визначення дисперсних характеристик і питомої міжфазної поверхні висококонцентрованих краплинних потоків, порівняння конструкцій форсунок та обґрунтування параметрів розпилювальних контактних апаратів.

Ключові слова: електроконтактна діагностика; полідисперсність; питома міжфазна поверхня; локальна питома витрата; окружна нерівномірність; число Рейнольдса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Контактні апарати розпилювального типу широко застосовуються в процесах тепло- і масообміну, газоочищення, нагрівання, охолодження й осушення газів, а також у технологіях спалювання рідких палив [1; 2]. Ефективність таких апаратів значною мірою визначається характеристиками краплинного потоку, сформованого розпилювальними пристроями.

Однією з основних характеристик краплинного потоку є дисперсний склад. Розміри крапель визначають питому поверхню контакту фаз, інтенсивність тепло- і масообміну, швидкість випаровування та, зрештою, ефективність технологічного процесу [1; 3]. Тому для розрахунку і проєктування контактних апаратів необхідна інформація не лише про витратні характеристики розпилювачів, але й про локальний та інтегральний дисперсний склад факела, розподіл рідини в його поперечному перерізі та утворену міжфазну поверхню [1; 2].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для визначення дисперсного складу розпилів застосовують контактні та безконтактні методи, зокрема метод уловлювання крапель в імерсійну рідину, цифровий аналіз зображень, лазерну дифракцію та фазово-доплерівські методи [3; 4]. Окрему групу становлять електроконтактні методи, до яких належить запропонований Wicks і Dukler лічильно-імпульсний метод для електропровідних рідин [5]. Результати визначення дисперсного складу можуть залежати від принципу вимірювання та алгоритмів обробки первинних даних, що необхідно враховувати при порівнянні результатів, отриманих різними методами [4; 6].

Для статистичного опису полідисперсних краплинних потоків застосовують різні функції розподілу за розмірами, зокрема нормальний, логнормальний, гамма-, Rosin–Rammler та Nukiyama–Tanasawa розподіли [3]. Такі функції забезпечують компактне представлення експериментальних даних та визначення характерних параметрів дисперсного складу. Водночас вибір конкретної функції має відповідати фактичній формі експериментального розподілу.

Значна увага в сучасних дослідженнях приділяється впливу режимних параметрів розпилювання на дисперсний склад. Для порожнистофакельних форсунок встановлено зменшення характерних діаметрів крапель зі збільшенням робочого тиску [7]. Розмір крапель та ширина спектра залежать також від типу форсунки, витрати рідини та просторового положення точки вимірювання у факелі [8]. Дослідження структури факела відцентрової форсунки методом фазово-доплерівського аналізу показало просторову неоднорідність розподілу розмірів і швидкостей крапель та наявність області стабілізації дисперсного складу [9]. Для порожнистофакельних форсунок також встановлено залежність медіанного діаметра, ширини спектра та швидкості крапель від тиску і відстані від сопла [10].

Іншим напрямом досліджень є встановлення взаємозв'язку між геометрією відцентрової форсунки, параметрами рідинної плівки та характеристиками утвореного факела. Чисельні дослідження внутрішньої течії у відцентровій форсунці показують суттєвий вплив кількості тангенціальних підвідних каналів та геометрії вихідної частини на структуру повітряного ядра, рівномірність розподілу рідини та кут факела [11]. Сучасні моделі первинного розпаду пов'язують дисперсний склад з товщиною і швидкістю рідинної плівки на виході з форсунки та розвитком її гідродинамічної нестійкості [12]. Запропоновані також розрахункові залежності для середнього діаметра крапель, що безпосередньо враховують геометричні параметри відцентрової форсунки [13].

Вплив геометричних параметрів на характеристики факела підтверджено також для модифікованих відцентрових форсунок та при чисельному моделюванні процесу первинного розпаду [14; 15]. Для розпилювання емульсій показано, що гідродинамічні умови всередині відцентрової форсунки, геометрія каналу та режимні параметри визначають інтенсивність деформації й руйнування дисперсної фази [16; 17; 18]. Залежність характеристик розпилу від геометрії та режиму течії встановлена також для двофазних конічних вихрових розпилювачів і відцентрових форсунок з гвинтовими підвідними каналами [19; 20].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на розвиток оптичних методів діагностики розпилів, актуальною залишається задача визначення локальних характеристик висококонцентрованих краплинних потоків відносно простими контактними засобами вимірювання. Практичний інтерес становить лічильно-імпульсний метод, заснований на реєстрації контактів крапель електропровідної рідини з електродами вимірювального датчика [5]. Однак для його застосування при дослідженні відцентрових форсунок необхідне математичне обґрунтування переходу від вимірюваної частоти імпульсів до функції розподілу крапель за розмірами, визначення питомої поверхні та локальної питомої витрати рідини, а також методика узагальнення локальних вимірювань для всього поперечного перерізу неоднорідного факела. Окремою задачею є встановлення зв'язку між дисперсними характеристиками краплинного потоку та геометричними і режимними параметрами відцентрових форсунок.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розроблення та обґрунтування методики застосування лічильно-імпульсного методу для визначення локальних і узагальнених характеристик дисперсної структури краплинних потоків, сформованих відцентровими форсунками, та встановлення залежності цих характеристик від конструктивних і режимних параметрів розпилювачів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процес формування дисперсної структури краплинних потоків при розпилюванні води відцентровими полофакельними форсунками. Предмет дослідження – локальні та узагальнені характеристики розподілу крапель за розмірами, питома поверхня і питома витрата рідини в поперечному перерізі факела та їх залежність від конструктивних і режимних параметрів форсунок.

Для експериментального визначення дисперсної структури застосовано лічильно-імпульсний метод. Він ґрунтується на реєстрації електричних імпульсів h, які виникають при одночасному контакті краплі електропровідної рідини з кінцями двох електродів. Відстань між електродами S дискретно змінюється (рис. 1), що дає змогу експериментально визначати залежність частоти замикань від міжелектродної відстані.

Якщо центр довільної краплі діаметром $D > S$ пройде в міжелектродному просторі через область $K'(S, D)$, і при цьому крапля одночасно торкнеться кінців двох електродів, то в колі виникає імпульс струму, який після підсилення і перетворення фіксується електронним лічильником. При дискретній зміні відстані S між електродами стає можливим отримати експериментальну залежність частоти замикань краплями кінців електродів $h(S)$.

З іншого боку, на основі теорії ймовірностей частоту замикань $h(S)$ можна виразити у вигляді інтегрального рівняння:

$$h(S)=\frac{1}{2}\int_{S}^{\infty}\left[D^2\arccos\frac{S}{D}-S\sqrt{D^2-S^2}\right]\varphi_0(D)\,dD, \qquad (1)$$

де $\varphi_0(D)$ – ненормована диференціальна функція розподілу числа крапель за діаметром.

Інтегральне рівняння (1) є рівнянням Вольтерра першого роду. Його безпосереднє чисельне обернення є нестійким до похибок експериментальної залежності $h(S)$. Після дворазового диференціювання та заміни змінних $D = t^{-1/2}$, $S = \xi^{-1/2}$ і ввівши позначення:

$$h''(S)=\psi(\xi), \quad \frac{1}{2t}\varphi_0\left(t^{-1/2}\right)=u(t),$$

було отримано інтегральне рівняння Абеля:

$$\psi(\xi)=\int_0^{\xi}\frac{u(t)\,dt}{(\xi t)^{\frac{1}{2}}}. \qquad (2)$$

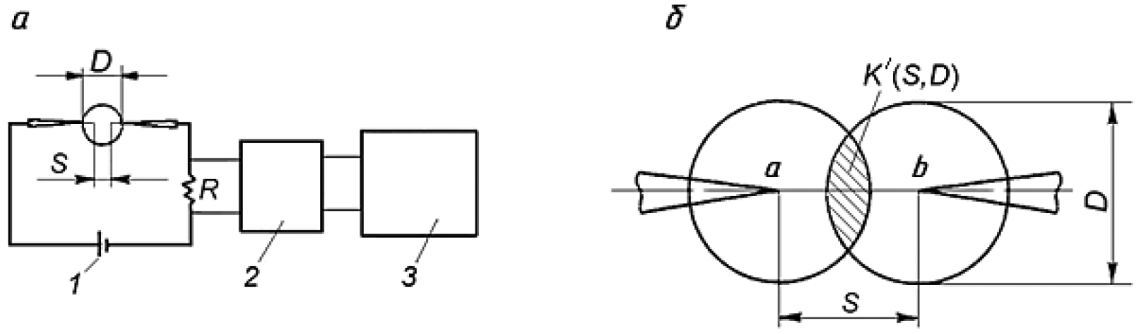


Рис. 1. Схема лічильно-імпульсного методу вимірювання розмірів крапель: *а* – схема вимірювання частоти замикань: *1* – джерело живлення; *2* – формувач-підсилювач; *3* – електронний лічильник (частотомір); *б* – контакт краплі з електродом: $K'(S, D)$ – площа, де знаходиться центр краплі діаметром D при відстані між електродами S, яка може торкнутися кінців електродів

Таке рівняння має точний аналітичний розв'язок, який у початкових змінних можна записати у вигляді:

$$\varphi_0(D) = -\frac{2}{\pi D}\int_D^{\infty} S(S^2 - D^2)^{-\frac{1}{2}} h'''(S)\,dS. \qquad (3)$$

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Експериментальні дослідження, проведені авторами цієї роботи, показали, що для краплинних потоків, сформованих дослідженими відцентровими форсунками, залежність частоти замикань електродів від міжелектродної відстані добре апроксимується експоненціальною функцією:

$$h(S) = B\exp(-\alpha S), \qquad (4)$$

де B – частота замикань h при $S \to 0$;

α – параметр, що характеризує дисперсний склад крапель в однопараметричній залежності від D, яка отримана з рівняння (3), причому B скорочується при нормуванні, тобто:

$$\varphi_0(D) = \frac{2B\alpha^3}{\pi} K_1(\acute{a}D), \qquad (5)$$

де K_1 – функція Бесселя другого роду першого порядку.

Диференціальна функція розподілу об'єму крапель за діаметром $v(D)$ має вигляд:

$$v(D) = \frac{2\alpha^4}{3\pi} D^3 K_1(\alpha D). \qquad (6)$$

Із експериментальної залежності $h(S)$ параметр α визначається як, 1/мм

$$\alpha = \frac{\ln\dfrac{h(S_1)}{h(S_2)}}{S_2 - S_1}. \qquad (7)$$

Час вимірювання числа замикань краплями електродів при відповідних зазорах S був статистично обґрунтований для конкретних умов диспергування та параметрів електронної апаратури.

Із рівняння (6) отримані значення модального D_m, медіанного $D_{0,5}$ та умовно максимального $D_{0,95}$ діаметрів крапель для функції $v(D)$, які відповідно визначаються як:

$$D_m = \frac{2{,}387}{\alpha}, \qquad D_{0,5} = \frac{3{,}05}{\alpha}, \qquad D_{0,95} = \frac{7}{\alpha}. \qquad (8)$$

На рис. 2 показані типові для досліджених відцентрових форсунок експериментальні залежності $h(S)$, диференціальна $v(D)$ та інтегральна $V(D)$ функції розподілу об'єму крапель за діаметром.

У даній роботі також було проведено порівняння результатів визначення дисперсного складу крапель в одній і тій самій зоні потоку за допомогою лічильно-імпульсного методу і методом уловлювання крапель в імерсійний шар. Отримані результати показали достовірність визначення дисперсної структури крапельного потоку за допомогою лічильно-імпульсного методу і ефективність обробки експериментальних даних однопараметричною залежністю функції розподілу об'єму крапель за діаметром.

Лічильно-імпульсний метод дає змогу визначати локальне значення питомої поверхні крапель f, м^2/кг, віднесене до маси диспергованої рідини

$$f = \frac{6\cdot 10^3}{\rho_р}\int_0^{\infty}\frac{v(D)}{D}dD = 2{,}53\cdot 10^3\frac{\alpha}{\rho_р}, \qquad (9)$$

де f – питома поверхня, м^2/кг; $\rho_р$ – густина рідини, кг/м^3.

Було також розроблено методику вимірювання локального значення питомої витрати диспергованої рідини в досліджуваній точці крапельного потоку. Для визначення локальної питомої витрати диспергованої рідини використовується ненормована диференціальна функція розподілу числа крапель за діаметром $\varphi_0(D)$. Добуток $\varphi_0(D)dD$ характеризує густину потоку зареєстрованих крапель з діаметрами в інтервалі від D до $D + dD$, тобто число таких крапель, що проходять за одиницю часу через одиницю площі в зоні вимірювання.

Фактична густина потоку крапель перевищує значення, зареєстроване вимірювальною системою, оскільки частина крапель не формує імпульс, достатній для реєстрації. З урахуванням цього густина потоку числа крапель визначається як

$$n = \beta\int_{D_{\min}}^{\infty}\varphi_0(D)dD, \qquad (10)$$

де $D_{\min}$ – достовірно вимірюваний мінімальний розмір крапель;

β – коефіцієнт, що показує співвідношення між дійсним числом крапель і кількістю зареєстрованих крапель, які проходять через зону вимірювання.

З урахуванням (4) і (6) локальну питому об'ємну витрату крапельної рідини можна знайти як, мм^3/(мм^{2}с)

$$g = \beta\frac{\pi}{2}\frac{B}{\alpha}. \qquad (11)$$

Значення коефіцієнта β зумовлене параметрами реєструвальної апаратури та електропровідністю рідини. Для конкретних умов експериментів β визначається шляхом порівняння результатів вимірювання в тій самій точці крапельного потоку питомої витрати диспергованої рідини лічильно-імпульсним методом і за допомогою відбірної трубки з подальшим зливом води в мірну ємність, як показано на рис. 3.

Досліджувані відцентрові порожнистофакельні форсунки поділялися на два типи: У-1 – з одним підвідним каналом до камери закручування та УЦ – з двома і більше каналами (рис. 4). Для форсунок У-1 характерна значна окружна нерівномірність подачі

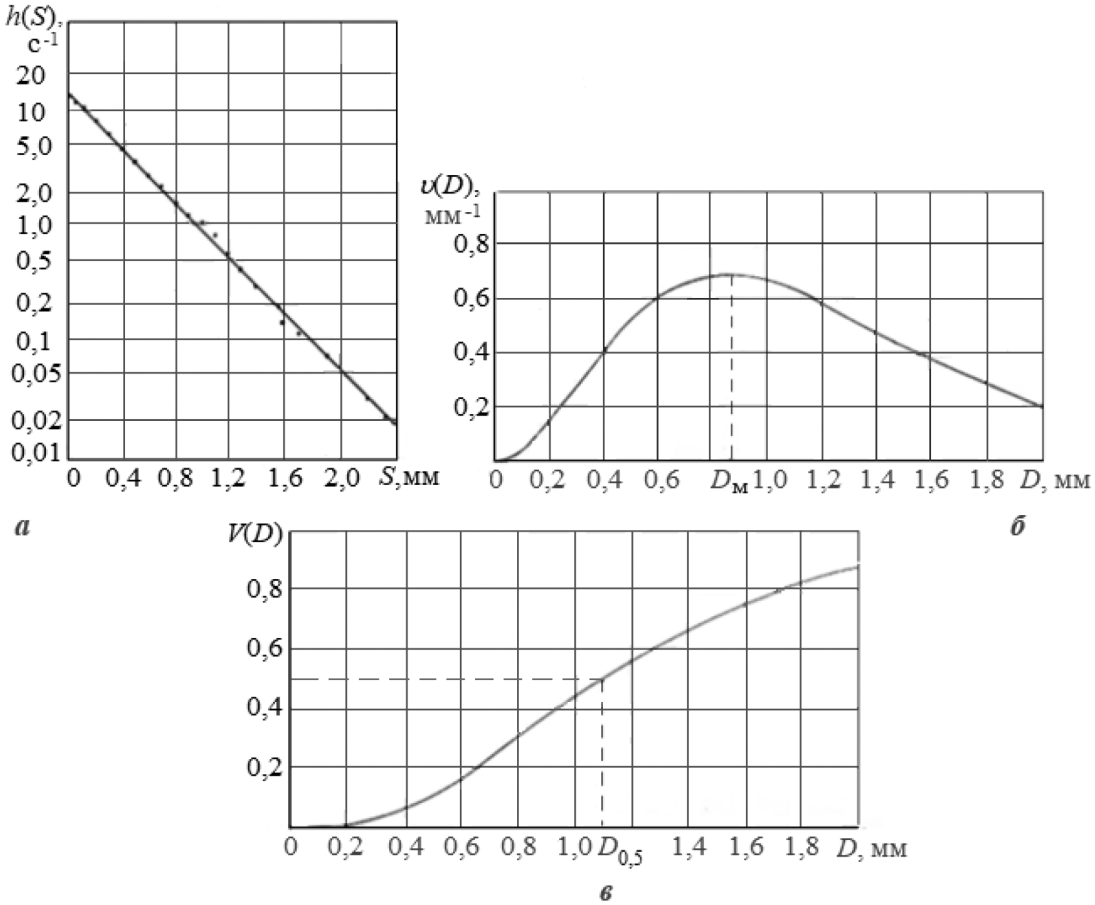


Рис. 2. Типові залежності для досліджених відцентрових форсунок: *а* – експериментальна залежність $h(S)$; *б* – диференціальна об'ємна функція розподілу $\upsilon(D)$; *в* – інтегральна об'ємна функція розподілу $V(D)$ ($\alpha = 2{,}75$ мм$^{-1}$, $D_м = 0{,}868$ мм, $D_{0,5} = 1{,}1$ мм, $D_{0,95} = 2{,}54$ мм)

рідини, тоді як форсунки УЦ формують практично осесиметричний факел.

У даній роботі також досліджувався процес розпаду на краплі суцільної плівки води, що виходить із форсунки на різних відстанях від неї. Встановлено, що залежно від геометричних і режимних параметрів зона формування дисперсного складу закінчується на відстані 50–250 мм від форсунки; тому вимірювання проводили за цією зоною, в області стабільного дисперсного складу.

Крапельні потоки, що утворюються відцентровими порожнистофакельними форсунками, мають порожнистоконусну форму факела. При траверсуванні зондом лічильно-імпульсного методу уздовж радіуса такого факела, як показано на рис. 5, у центрі бічної зони факела (при $x = 0$) спостерігається максимальна питома витрата крапель диспергованої рідини g. На периферії, тобто ззовні та всередині твірної полого конуса, g зменшується практично до нуля.

Аналогічно значенням питомої витрати змінюється і дисперсний склад крапель, що характеризується в даному випадку модальним діаметром $D_м$. Якщо при цьому, як, наприклад, для форсунок типу У-1, має місце суттєва нерівномірність подачі диспергованої рідини за колом факела, що видно з рис. 4, *а*, то виникає

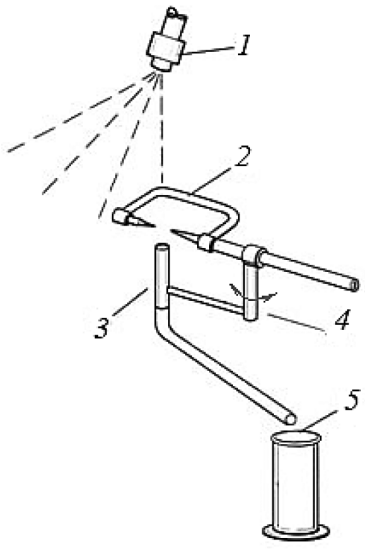


Рис. 3. Схема датчиків для локального вимірювання дисперсного складу крапель та питомої витрати рідини: *1* – відцентрова форсунка; *2* – датчик для вимірювання дисперсного складу крапель за допомогою лічильно-імпульсного методу; *3* – відбірна трубка для вимірювання витрати крапельної рідини; *4* – поворотний кронштейн; *5* – мірна ємність

ISSN 3154–8245 (print), 3154–8253 (online)

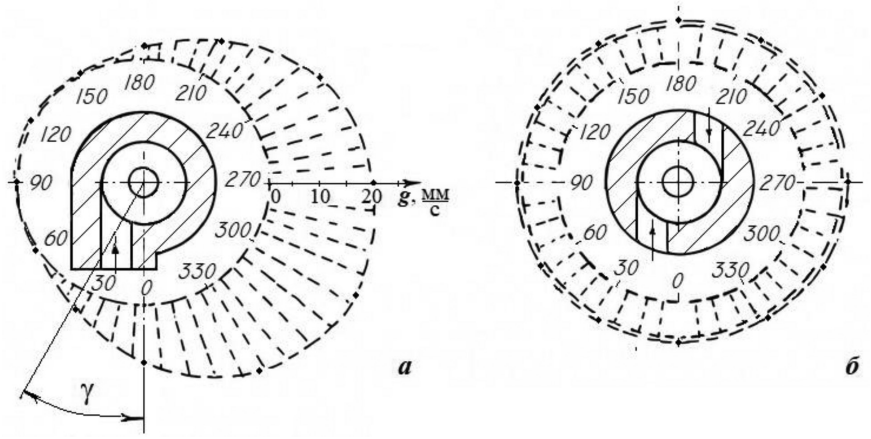


Рис. 4. Схема форсунок та епюри розподілу питомої витрати крапельної рідини диспергованої відцентровими форсунками: *а*) форсунка типу У-1: d_c = 4 мм; вхідний канал d = 5 мм; $R_к$ = 9 мм; ΔP = 0,3 МПа; l = 0,4 м; *б*) форсунка типу УЦ: d_c = 8 мм; два вхідних канали 5,5 × 5,5 мм; $R_к$ = 9 мм; ΔP = 0,3 МПа; l = 0,4 м

необхідність описання локальних значень функцій розподілу $v(D)$, виміряних у відповідних точках перерізу факела форсунки, однією приведеною функцією $\overline{\upsilon}(D)$, яка описує всю сукупність крапель, що проходять через цей переріз, і, відповідно, утворюються форсункою.

Методика визначення приведеного дисперсного складу всіх крапель, що подаються форсункою, полягає в наступному. Дисперсний склад крапель, наприклад у вигляді функції розподілу $v(D)$, вимірюваної в елементарній зоні поперечного перерізу факела форсунки, при описанні складу генеральної сукупності всіх крапель, які утворюються форсункою, повинен входити до нього з «вагою» питомої витрати рідкої компоненти g у даній точці факела площею dF. Тому необхідне інтегрування по всій площі кільцевого перерізу факела, тобто спочатку вздовж радіуса (по осі x (рис. 5)), в межах елементарного сектору $d\gamma$ перерізу факела.

Потім, як, наприклад, показано на рис. 4, для форсунок типу У-1 необхідно виконувати інтегрування за колом від $\gamma = 0$ до $\gamma = 360°$. Для форсунок типу УЦ, з осесиметричною формою факела, достатньо інтегрування вздовж радіуса, тобто по осі x.

У загальному вигляді вираз для обчислення значень приведеної функції для D_i має вигляд:

$$\overline{\upsilon}(D_i) = \frac{\iint\limits_F v(x,y,D_i)\,g(x,y)\,dF}{\iint\limits_F g(x,y)\,dF}. \qquad (12)$$

Для чисельного інтегрування за площею поперечного перерізу факела вираз (12) записується у вигляді:

$$\overline{\upsilon}(D_i) = \frac{\sum\limits_{j=1}^{n} v(x_j,y_j,D_j)\,g(x_j,y_j)\,\Delta F_j}{\sum\limits_{j=1}^{n} g(x_j,y_j)\,\Delta F_j}. \qquad (13)$$

Причому, як показано раніше, за допомогою лічильно-імпульсного методу можливе визначення питомої витрати g одночасно з вимірюванням параметрів дисперсного складу крапель.

Для подальших розрахунків і аналізу результатів досліджень узагальнену функцію $\overline{\upsilon}(D)$ можна апроксимувати однопараметричною залежністю від параметра α, використовуючи вираз для модального діаметра $D_м$

$$\alpha = \frac{2{,}387}{D_м}.$$

У якості прикладу на рис. 6 показані графіки функції $v(D)$, виміряні в різних секторах окружності перерізу факела форсунки У-1 тільки в точках

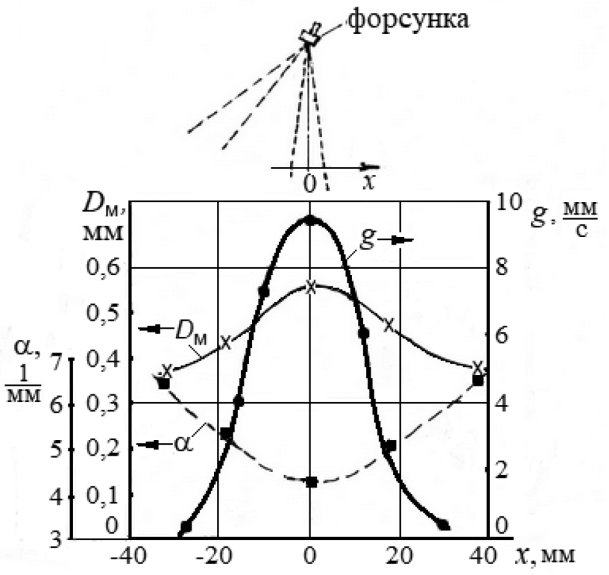


Рис. 5. Локальні характеристики поперечного перерізу факела форсунки УЦ

максимальної витрати g, тобто при $x = 0$ (див. рис. 4 та 5), а також приведеної функції $\bar{\upsilon}(D)$.

Порівняння графіків № 2 и № 5 (див. рис. 6) показує на різницю функції $v(D)$ по модальному діаметру крапель $D_м$ більш ніж у 3 рази, що також підтверджує необхідність визначення приведеної функції $\bar{\upsilon}(D)$.

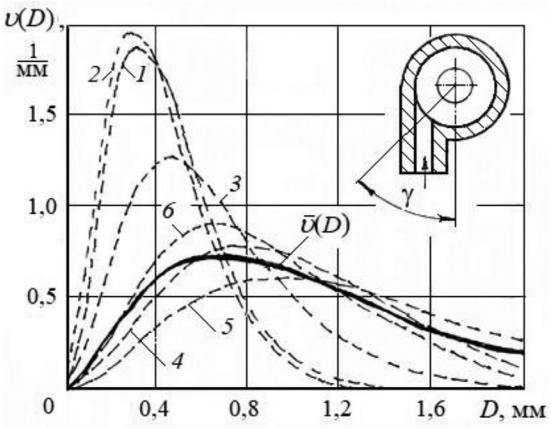


Рис. 6. Графіки функції $v(D)$, отримані в різних секторах кола перерізу факела форсунки У-1 і приведена функція $\bar{\upsilon}(D)$: *1* – $\gamma = 60°$; *2* – $\gamma = 120°$; *3* – $\gamma = 180°$; *4* – $\gamma = 240°$; *5* – $\gamma = 300°$; *6* – $\gamma = 360°$

Модальні діаметри для кривих 2 і 5 відрізняються більш ніж утричі, що підтверджує необхідність визначення приведеної функції. Її положення поблизу кривих 4 і 5 зумовлене переважним внеском зон з найбільшою питомою витратою рідини ($\gamma = 120°…330°$), як показано на рис. 4.

Як відомо, одним із напрямків підвищення ефективності роботи контактних апаратів є збільшення поверхні взаємодії між газом і краплями при мінімальних енерговитратах на диспергування. Для порівняння ефективності диспергування форсунками У-1 і УЦ використовували питому поверхню крапель f. Порівнювані форсунки мали однакову безрозмірну геометричну характеристику $A = 0{,}97$:

$$A = \frac{R \cdot \pi \cdot d_c}{2 \cdot n \cdot S}, \qquad (14)$$

де R – ексцентриситет осі тангенціальних каналів до камери закручування відносно осі сопла;

d_c – діаметр сопла форсунки;

n – кількість тангенціальних підвідних каналів;

S – площа поперечного перерізу кожного підвідного каналу.

Як видно з рис. 7, значення питомої поверхні крапель води f, м²/кг, що створюються форсунками УЦ, при тих самих перепадах тиску ΔP на 40–50 % більше, ніж для форсунок типу У-1.

Для форсунок типу УЦ однакове значення питомої поверхні крапель досягається за перепаду тиску приблизно у 5 разів меншого, ніж для форсунок У-1. Це вказує на можливість зменшення гідравлічних

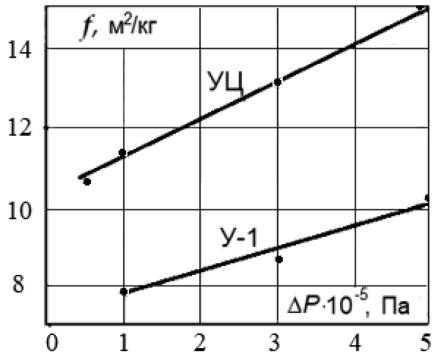


Рис. 7. Значення питомої поверхні крапель для форсунок типу У-1 та УЦ

енерговитрат на диспергування рідини. Отже, для створення крапельної поверхні в контактних апаратах доцільно використовувати форсунки з осесиметричним факелом крапельного потоку типу УЦ. Тому в даній роботі також виконані вимірювання та узагальнення результатів дослідження дисперсної структури крапельних потоків, що утворюються форсунками типу УЦ зі зміною геометричних і режимних параметрів роботи, які наведені в табл. 1.

Експерименти проводилися в нерухомому повітрі при атмосферному тиску і температурі води і повітря близько 20 °С.

Як показано на рис. 8, в результаті досліджень дисперсний склад крапель узагальнено безрозмірним критеріальним рівнянням

$$\frac{D_м}{\delta} = 9{,}76\,\mathrm{Re}_n^{-0{,}304}, \qquad (15)$$

або з урахуванням виразу (8) для $D_м$, параметр α, що характеризує дисперсний склад крапель, які утворюються форсунками типу УЦ, визначається з виразу

$$\alpha = \frac{0{,}245}{\delta}\mathrm{Re}_n^{0{,}304}, \qquad (16)$$

де $\mathrm{Re}_n = (u \cdot \delta)/\nu_p$ – критерій Рейнольдса;

$u = \varphi\sqrt{2\Delta P/\rho_p}$ – швидкість виходу плівки рідини з сопла форсунки, м/с;

φ – швидкісний коефіцієнт;

δ – товщина плівки рідини, м;

ρ – густина рідини, кг/м³;

ν – коефіцієнт кінематичної в’язкості, м²/с.

При формуванні критеріального рівняння (15) були використані добре відомі для порожнистофакельних відцентрових форсунок залежності коефіцієнта витрати μ, швидкісного коефіцієнта φ і кута розкриття факела θ від безрозмірної геометричної характеристики форсунки A.

Величини, що входять у рівняння (16), апроксимовано залежностями:

$$\delta = d_c \cdot 0{,}127A^{-0{,}73}, \qquad (17)$$

$$\varphi = 0{,}54A^{-0{,}36}). \qquad (18)$$

Таблиця 1. Геометричні та режимні параметри роботи досліджуваних форсунок типу УЦ

Діаметр сопла, мм	Кількість підвідних каналів	Розміри підвідних каналів, мм × мм	Радіус камери закручування, мм	Безрозмірна геометрична характеристика форсунки	Товщина плівки рідини, мм	Перепад тиску на форсунці, МПа	Умовне позначення на рис. 8
3	2	3,2×3,2	5	0,77	0,469	1; 3; 5	●
4	2	3,3×3,3	6	1,2	0,462	1; 3; 5	○
4	2	2,8×2,8	6	1,8	0,343	2; 3; 5	△
5	2	3,7×3,7	7,5	1,56	0,460	1; 2; 3; 5	▲
5	2	2,5×2,5	7,5	3,45	0,259	1; 2; 3; 5	□
6	2	2,3×2,3	9	5,6	0,209	1; 3; 5	■
6	2	4×4	9	2,0	0,777	1; 3; 5	◇
6	4	4×4	9	1,0	0,470	1; 2; 3	+
6	2	5,5×5,5	9	0,97	0,797	0,5;1;3;5	▽
6	4	5,5×5,5	9	0,485	1,17	1; 2; 4; 5	×

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати показали, що для відцентрових форсунок типу УЦ дисперсний склад краплинного потоку може бути пов'язаний з геометричними та режимними параметрами розпилювача через товщину рідинної плівки та число Рейнольдса. Такий підхід відповідає сучасним уявленням про первинне розпилювання у відцентрових форсунках, відповідно до яких товщина і швидкість рідинної плівки на виході з форсунки є визначальними параметрами формування дисперсного складу [12; 13]. Встановлена в цій роботі залежність (15) дає змогу визначити параметр дисперсного складу (16) і за ним розрахувати характерні діаметри та питому поверхню крапель у межах досліджених режимів роботи форсунок.

Локальні вимірювання виявили суттєву неоднорідність дисперсного складу в поперечному перерізі факела. Для форсунок типу У-1 модальні діаметри крапель у різних секторах відрізнялися більш ніж утричі. Просторові зміни дисперсних характеристик у факелах відцентрових та порожнистофакельних форсунок відзначаються також в інших експериментальних дослідженнях [9; 10]. Тому характеристика дисперсного складу лише в окремій точці не може бути репрезентативною для всього факела. Запропонована приведена функція розподілу враховує одночасно локальний дисперсний склад і питому витрату рідини та дає змогу характеризувати всю сукупність крапель, сформованих форсункою.

Порівняння конструкцій показало, що форсунки УЦ з двома і більше підвідними каналами формують практично осесиметричний факел, тоді як для форсунок У-1 характерна значна окружна нерівномірність розподілу рідини. Вплив кількості підвідних каналів на рівномірність внутрішньої течії та розподіл рідини показаний також у чисельному дослідженні відцентрових форсунок [11]. За однакового перепаду тиску питома поверхня крапель, сформованих дослідженими форсунками УЦ, була на 40–50 % більшою, що свідчить про їх перевагу за здатністю формувати розвинену міжфазну поверхню за досліджених умов.

Водночас кількісне зіставлення отриманих дисперсних характеристик з результатами інших авторів

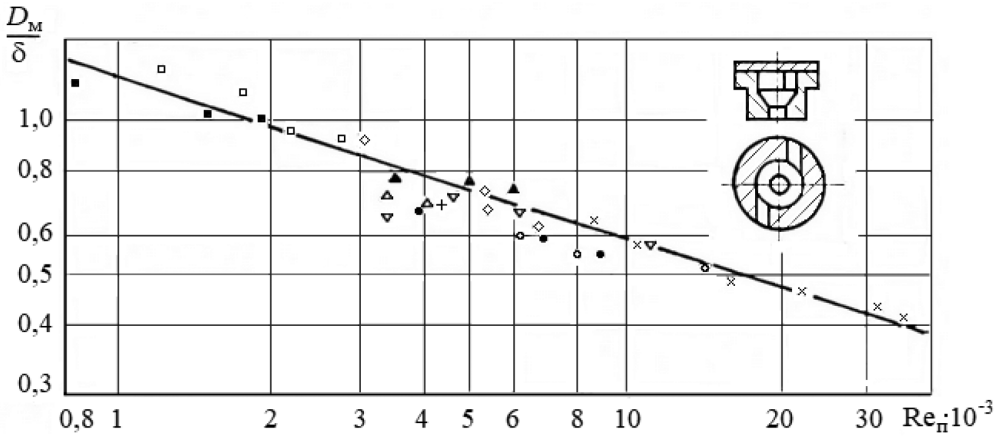


Рис. 8. Експериментальні дані та критеріальна залежність (15)

має обмеження, зумовлені відмінностями геометрії форсунок, режимів розпилювання та методів вимірювання. Порівняльні дослідження показують, що різні методи визначення розмірів крапель можуть давати систематично відмінні результати [4], а при методах, заснованих на аналізі зображень, додаткове значення мають алгоритми їх обробки [6]. Тому важливим елементом подальшої верифікації лічильно-імпульсного методу є кількісне порівняння його результатів із незалежними методами вимірювання дисперсного складу.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичне обґрунтування та методику застосування лічильно-імпульсного методу для визначення дисперсної структури краплинних потоків електропровідної рідини. Експериментальна залежність частоти замикань електродів від відстані між ними може бути описана однопараметричною експоненціальною функцією, параметр якої дає змогу визначати характерні діаметри крапель та їх питому поверхню.

2. Запропоновано методику визначення приведеної функції розподілу крапель за розмірами, яка враховує локальний дисперсний склад і питому витрату рідини в різних зонах поперечного перерізу факела. Це дає змогу характеризувати дисперсний склад усієї сукупності крапель при просторово неоднорідному розподілі рідини.

3. Експериментально встановлено суттєву окружну нерівномірність розподілу рідини у факелах форсунок У-1 та практично осесиметричний характер факелів форсунок УЦ. За однакового перепаду тиску питома поверхня крапель, сформованих дослідженими форсунками УЦ, була на 40–50 % більшою, ніж для форсунок У-1.

4. Для досліджених форсунок типу УЦ отримано критеріальну залежність між модальним діаметром крапель, товщиною рідинної плівки та числом Рейнольдса. Залежність може бути використана для оцінювання параметра та пов’язаних із ним характеристик дисперсного складу в межах досліджених геометричних і режимних параметрів.

Інформація про використання штучного інтелекту. Під час підготовки статті інструменти штучного інтелекту використовувалися виключно для мовного редагування, перевірки граматики, перекладу або інших допоміжних завдань, без використання згенерованих ними об’єктів як результатів академічної діяльності.

REFERENCES

[1] Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017). *Atomization and sprays* (2nd ed.). CRC Press. DOI: 10.1201/9781315120911

[2] Ashgriz, N. (Ed.). (2011). *Handbook of atomization and sprays: Theory and applications*. Springer. DOI: 10.1007/978-1-4419-7264-4

[3] Privitera, S., Manetto, G., Pascuzzi, S., Pessina, D., & Cerruto, E. (2023). Drop size measurement techniques for agricultural sprays: A state-of-the-art review. *Agronomy, 13*(3), 678. DOI: 10.3390/agronomy13030678

[4] Sijs, R., Kooij, S., Holterman, H. J., Van De Zande, J., & Bonn, D. (2021). Drop size measurement techniques for sprays: Comparison of image analysis, phase Doppler particle analysis, and laser diffraction. *AIP Advances, 11*(1), 015315. DOI: 10.1063/5.0018667

[5] Wicks, M., & Dukler, A. E. (1966). *In situ measurements of drop size distribution in two-phase flow: A new method for electrically conducting liquids* [Conference paper]. Third International Heat Transfer Conference, Chicago, IL.

[6] Cerruto, E., Manetto, G., Privitera, S., Papa, R., & Longo, D. (2022). Effect of image segmentation thresholding on droplet size measurement. *Agronomy, 12*(7), 1677. DOI: 10.3390/agronomy12071677

[7] Cerruto, E., Manetto, G., Papa, R., & Longo, D. (2021). Modelling spray pressure effects on droplet size distribution from agricultural nozzles. *Applied Sciences, 11*(19), 9283. DOI: 10.3390/app11199283

[8] He, Y., Wu, J., Fu, H., Sun, Z., Fang, H., & Wang, W. (2022). Quantitative analysis of droplet size distribution in plant protection spray based on machine learning method. *Water, 14*(2), 175. DOI: 10.3390/w14020175

[9] Wang, J., Xu, C., Zhou, G., & Zhang, Y. (2020). Spray structure and characteristics of a pressure-swirl dust suppression nozzle using a phase Doppler particle analyze. *Processes, 8*(9), 1127. DOI: 10.3390/pr8091127

[10] Yuan, F., Gu, C., Yi, K., Dou, H., Li, S., Yang, S., Zou, W., & Zhai, C. (2023). Atomization characteristics of a hollow cone nozzle for air-assisted variable-rate spraying. *Agriculture, 13*(10), 1992. DOI: 10.3390/agriculture13101992

[11] Ronceros, J., Raymundo, C., Ayala, E., Rivera, D., Vinces, L., Ronceros, G., & Zapata, G. (2023). Study of internal flow in open-end and closed pressure-swirl atomizers with variation of geometrical parameters. *Aerospace, 10*(11), 930. DOI: 10.3390/aerospace10110930

[12] Qian, W., Wang, J., Hui, X., Yang, S., Cheng, R., & Wang, P. (2024). An improved comprehensive atomization model for pressure swirl atomizers. *Aerospace, 11*(8), 658. DOI: 10.3390/aerospace11080658

[13] Ronceros Rivas, J. R., Porto Pimenta, A., Lessa, J. S., & Ronceros Rivas, G. A. (2022). An improved theoretical formulation for Sauter mean diameter of pressure-swirl atomizers using geometrical parameters of atomization. *Propulsion and Power Research, 11*(2), 240–252. DOI: 10.1016/j.jppr.2022.02.007

[14] Gad, H. M., Baraya, E. A., Farag, T. M., & Ibrahim, I. A. (2022). Effect of geometric parameters on spray characteristics of air assisted pressure swirl atomizer. *Alexandria Engineering Journal, 61*(7), 5557–5571. DOI: 10.1016/j.aej.2021.11.010

[15] Salvador, F. J., Martí-Aldaraví, P., Lozano, A., Taghavifar, H., & Nemati, A. (2024). Droplet characterization of a pressure-swirl atomizer by means of high-fidelity modelling based on DNS simulations. *Fuel, 358*, 130169. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130169

[16] Ballesteros Martínez, M. Á., & Gaukel, V. (2023). Using computation fluid dynamics to determine oil droplet breakup parameters during emulsion atomization with pressure swirl nozzles. *Fluids, 8*(10), 277. DOI: 10.3390/fluids8100277

[17] Höhne, S., Taboada, M. L., Schröder, J., Gomez, C., Karbstein, H. P., & Gaukel, V. (2024). Influence of nozzle geometry and scale-up on oil droplet breakup in the atomization step during spray drying of emulsions. *Fluids, 9*(3), 70. DOI: 10.3390/fluids9030070

[18] Taboada, M. L., Zapata, E., Karbstein, H. P., & Gaukel, V. (2021). Investigation of oil droplet breakup during atomization of emulsions: Comparison of pressure swirl and twin-fluid atomizers. *Fluids, 6*(6), 219. DOI: 10.3390/fluids6060219

[19] Ochowiak, M., Krupińska, A., Włodarczak, S., Matuszak, M., Markowska, M., Janczarek, M., & Szulc, T. (2020). The two-phase conical swirl atomizers: Spray characteristics. *Energies, 13*(13), 3416. DOI: 10.3390/en13133416

[20] Ronceros, J., Raymundo, C., Zapata, G., Namay, W., & Ronceros, G. (2024). Comprehensive theoretical formulation and numerical simulation of the internal flow in pressure-swirl atomizers type screw-conveyer. *Energies, 17*(21), 5414. DOI: 10.3390/en17215414

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017). *Atomization and sprays* (2nd ed.). CRC Press. DOI: 10.1201/9781315120911

[2] Ashgriz, N. (Ed.). (2011). *Handbook of atomization and sprays: Theory and applications*. Springer. DOI: 10.1007/978-1-4419-7264-4

[3] Privitera, S., Manetto, G., Pascuzzi, S., Pessina, D., & Cerruto, E. (2023). Drop size measurement techniques for agricultural sprays: A state-of-the-art review. *Agronomy, 13*(3), 678. DOI: 10.3390/agronomy13030678

[4] Sijs, R., Kooij, S., Holterman, H. J., Van De Zande, J., & Bonn, D. (2021). Drop size measurement techniques for sprays: Comparison of image analysis, phase Doppler particle analysis, and laser diffraction. *AIP Advances, 11*(1), 015315. DOI: 10.1063/5.0018667

[5] Wicks, M., & Dukler, A. E. (1966). *In situ measurements of drop size distribution in two-phase flow: A new method for electrically conducting liquids* [Conference paper]. Third International Heat Transfer Conference, Chicago, IL.

[6] Cerruto, E., Manetto, G., Privitera, S., Papa, R., & Longo, D. (2022). Effect of image segmentation thresholding on droplet size measurement. *Agronomy, 12*(7), 1677. DOI: 10.3390/agronomy12071677

[7] Cerruto, E., Manetto, G., Papa, R., & Longo, D. (2021). Modelling spray pressure effects on droplet size distribution from agricultural nozzles. *Applied Sciences, 11*(19), 9283. DOI: 10.3390/app11199283

[8] He, Y., Wu, J., Fu, H., Sun, Z., Fang, H., & Wang, W. (2022). Quantitative analysis of droplet size distribution in plant protection spray based on machine learning method. *Water, 14*(2), 175. DOI: 10.3390/w14020175

[9] Wang, J., Xu, C., Zhou, G., & Zhang, Y. (2020). Spray structure and characteristics of a pressure-swirl dust suppression nozzle using a phase Doppler particle analyze. *Processes, 8*(9), 1127. DOI: 10.3390/pr8091127

[10] Yuan, F., Gu, C., Yi, K., Dou, H., Li, S., Yang, S., Zou, W., & Zhai, C. (2023). Atomization characteristics of a hollow cone nozzle for air-assisted variable-rate spraying. *Agriculture, 13*(10), 1992. DOI: 10.3390/agriculture13101992

[11] Ronceros, J., Raymundo, C., Ayala, E., Rivera, D., Vinces, L., Ronceros, G., & Zapata, G. (2023). Study of internal flow in open-end and closed pressure-swirl atomizers with variation of geometrical parameters. *Aerospace, 10*(11), 930. DOI: 10.3390/aerospace10110930

[12] Qian, W., Wang, J., Hui, X., Yang, S., Cheng, R., & Wang, P. (2024). An improved comprehensive atomization model for pressure swirl atomizers. *Aerospace, 11*(8), 658. DOI: 10.3390/aerospace11080658

[13] Ronceros Rivas, J. R., Porto Pimenta, A., Lessa, J. S., & Ronceros Rivas, G. A. (2022). An improved theoretical formulation for Sauter mean diameter of pressure-swirl atomizers using geometrical parameters of atomization. *Propulsion and Power Research, 11*(2), 240–252. DOI: 10.1016/j.jppr.2022.02.007

[14] Gad, H. M., Baraya, E. A., Farag, T. M., & Ibrahim, I. A. (2022). Effect of geometric parameters on spray characteristics of air assisted pressure swirl atomizer. *Alexandria Engineering Journal, 61*(7), 5557–5571. DOI: 10.1016/j.aej.2021.11.010

[15] Salvador, F. J., Martí-Aldaraví, P., Lozano, A., Taghavifar, H., & Nemati, A. (2024). Droplet characterization of a pressure-swirl atomizer by means of high-fidelity modelling based on DNS simulations. *Fuel, 358*, 130169. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130169

[16] Ballesteros Martínez, M. Á., & Gaukel, V. (2023). Using computation fluid dynamics to determine oil droplet breakup parameters during emulsion atomization with pressure swirl nozzles. *Fluids, 8*(10), 277. DOI: 10.3390/fluids8100277

[17] Höhne, S., Taboada, M. L., Schröder, J., Gomez, C., Karbstein, H. P., & Gaukel, V. (2024). Influence of nozzle geometry and scale-up on oil droplet breakup in the atomization step during spray drying of emulsions. *Fluids, 9*(3), 70. DOI: 10.3390/fluids9030070

[18] Taboada, M. L., Zapata, E., Karbstein, H. P., & Gaukel, V. (2021). Investigation of oil droplet breakup during atomization of emulsions: Comparison of pressure swirl and twin-fluid atomizers. *Fluids, 6*(6), 219. DOI: 10.3390/fluids6060219

[19] Ochowiak, M., Krupińska, A., Włodarczak, S., Matuszak, M., Markowska, M., Janczarek, M., & Szulc, T. (2020). The two-phase conical swirl atomizers: Spray characteristics. *Energies, 13*(13), 3416. DOI: 10.3390/en13133416

[20] Ronceros, J., Raymundo, C., Zapata, G., Namay, W., & Ronceros, G. (2024). Comprehensive theoretical formulation and numerical simulation of the internal flow in pressure-swirl atomizers type screw-conveyer. *Energies, 17*(21), 5414. DOI: 10.3390/en17215414

© Пересьолков О. Р., Кунденко М. П., Круглякова О. В., Демчук Є. С.
Дата першого надходження статті до видання: 13.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)