

MODELING OF AERODYNAMICALLY RATIONAL SPRAYING DEVICE

A. Pastushenko*

Mykolayiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine



Key words:

spraying plants,
sprayer,
two-phase medium,
boundary layer,
flow channel

Article history:

Received 10.04.2021

Accepted 10.05.2021

***Corresponding author:**

pastushenkoandrey1987
@gmail.com

ABSTRACT

The chemical method of plant protection is very common, as its advantages are biological and economic efficiency and a wide range of pesticides. Sprayers of various designs are used to treat plants with pesticides in agriculture. The problem of plant protection with chemicals is becoming increasingly important nowadays in agriculture. The state's agricultural production loses almost a third of the gross harvest in crop production from pests, diseases, and weeds. The existing chemical protection of crops needs to be developed and improved. This article raises the need of developing new analytical approaches to the design and implementation of spraying plants working bodies that meet modern technological requirements by improving the aerodynamic sprayer flow performance. The design of the spray can be considered perfect in aerodynamic terms if it shows the absence of boundary layer separation from the wall, or if the separation area is located as downstream as possible. To do this, the calculation determines the place of boundary layer separation from the wall based on the study of the working fluid two-phase environment and metabolic processes occurring in it, characteristics that significantly affect the formation and development of the boundary layer and its separation. This approach helps to reduce energy losses. Based on the study of existing analytical solutions that can be adapted to two-phase media in the channel of the working fluid atomizer movement model, in combination with the graph analytical method of constructing the channel surfaces. The paper established that the non-uniformity degree reduction of the velocity field in any section of the spraying device largely depends on the smooth transition from one section to another.

УДК 533.6.013.12:626.845

МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНО РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

А.С. Пастушенко*

Миколаївський національний аграрний університет, Миколаїв, Україна

**АНОТАЦІЯ**

Проблема хімічного захисту рослин набуває все більшого значення, оскільки аграрне виробництво держави втрачає від шкідників, хвороб та бур'янів, за окремими культурами, майже третину валового збору урожаю. Існуючий парк засобів хімічного захисту сільськогосподарських культур, цілеспрямований на підвищення ефективності цієї роботи, потребує розвитку і вдосконалення. Тематика статті обумовлена необхідністю розроблення нових аналітичних підходів щодо проектування робочих органів обприскувачів рослин, які відповідають сучасним технологічним вимогам, шляхом покращення аеродинамічних показників проточної частини розпилювача. Конструкція розпилювача є досконалою в аеродинамічному відношенні, якщо відсутній відрив прикордонного шару від стінки або якщо область відриву розташована як можна нижче за течією. Для цього визначається місце відриву прикордонного шару від стінки на основі дослідження двофазного середовища робочої рідини та обмінних процесів, характеристик, що істотно впливають на формування та розвиток прикордонного шару і його відрив, а, отже, на мінімізацію опору обтічних поверхонь. Наслідком цього підходу є зниження втрат енергії. На основі дослідження відомих аналітичних рішень, які можна адаптувати до моделювання руху двофазних середовищ у каналі розпилювача робочої рідини, в комплексі із графоаналітичним методом конструювання поверхонь каналу, запропоновано підхід, що дозволяє профілювати робочі органи обприскувачів зі зменшеними втратами енергії.

Ключові слова:

обприскування рослин,
розпилювач,
двофазне середовище,
прикордонний шар,
проточний канал

Історія публікації:

Отримано 10.04.2021

Затверджено 10.05.2021

*** Автор для****листування:**

pastushenkoandrey1987
@gmail.com

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.485>

Стан питання та постановка проблеми

Зміна клімату, виснаження ґрунтів, необдумане застосування пестицидів і добрив піддають ризику стійкість продовольчих і сільськогосподарських систем. Зокрема, надмірне застосування пестицидів призводить до знищення природних екосистем, що, в свою чергу, призводить до подальших спалахів хвороб. Це може підірвати продовольчу безпеку як на національному, так і на регіональному рівні. Інтенсивне зловживання особливо небезпечними хімічними речовинами перешкоджає ходу сільськогосподарських робіт, забезпеченню повноцінного харчування та наражає на небезпеку здоров'я населення і майбутнє сільського господарства.

При цьому хімічний метод захисту рослин залишається достатньо поширеним завдяки високій біологічній і економічній ефективності, широкому асортименту пестицидів [1] для захисту будь-якої сільськогосподарської культури, універсальності та доступності у використанні, швидкій і надійній дії.

Наприклад, програмою “Зерно України” передбачено вийти на щорічний обсяг виробництва зерна в країні [2] на рівні 80 млн. т. Проте погодні умови (потепління клімату) та господарські чинники (виведення сотень тисяч гектарів землі з господарського використання, порушення сівозмін, нестача техніки й пально-мастильних матеріалів, хімічних та біологічних засобів захисту тощо) часто є причиною загострення фітосанітарного стану посівів зернових. За цих умов мають місце масові розмноження та висока шкідливість шкідників, збудників хвороб рослин та бур'янів, через що недобори урожаїв зерна можуть сягати 30% і навіть 50% [3]. Отже, захист зернових культур від шкідливих організмів є важливим резервом для одержання значної частини додаткової продукції покращеної якості.

Одним з технічних засобів застосування пестицидів є наземні обприскувачі, які поділяються на автомобільні, тракторні та самохідні. Відбувається постійне удосконалення наземних обприскувачів з підвищенням техніко-економічних показників [4] шляхом збільшення робочої швидкості, ширини захвату, застосування комп'ютерних систем керування технологічними операціями внесення пестицидів. При цьому базовим для наземних штангових обприскувачів залишається щільний розпилювач та його модифікації.

Різні типи розпилювачів мають чималі резерви у покращенні експлуатаційних показників – економічності, надійності, довговічності екологічності та безпеки обслуговування, що обумовлює необхідність проведення досліджень з проектування енергоефективних робочих органів для реалізації технологічного процесу обприскування рослин.

Мета дослідження – дослідити рух багатокomпонентного середовища робочої рідини хімічного захисту рослин з метою профілювання аеродинамічно раціональної проточної частини установки і, як наслідок, зменшення втрат енергії під час процесу обприскування.

Матеріали і методи

Аналітичний опис процесу переміщення багатокomпонентного середовища виконано за допомогою рівнянь руху, що відображають плоску стаціонарну течію двофазного середовища за умови припущення, що обидві фази середовища нестисливі, фазові переходи, зіткнення частинок дисперсної фази і їх дроблення відсутні. Побудову проточної частини установки вирішено графоаналітичним методом конструювання поверхонь каналу.

Результати дослідження та обговорення

При розпилюванні засобів захисту рослин використовується двофазне середовище, одним із головних компонентів якого є рідина. Теоретичне рішення задачі про переміщення двофазних середовищ пов'язано із тим або іншим спрощенням реальної “картини” середовища, з тим або іншим ступенем ідеалізації його властивостей. Проте система диференціальних рівнянь для опису руху двофазної рідини повинна враховувати принципову розривність середовища та обмінні процеси, які в ньому відбуваються, а саме масообмін, обмін енергією та кількістю руху.

Одна зі схем формування системи рівнянь двофазного середовища полягає в тому, що рівняння збереження маси, кількості руху і енергії, а також рівняння стану, теплообміну і кінетики фазових переходів записуються окремо для кожної фази. Структура середовища вважається відомою. Цей метод при розв'язуванні прикладних задач пов'язаний зі значними труднощами, оскільки елементи дискретної фази в реальному середовищі різноманітні за розмірами, і, як правило, випадковим чином розподілені у просторі.

Більш перспективною є схематизація, коли вихідне гетерофазне середовище розглядається як нерозривне. У цьому випадку передбачається, що кожна із фаз рівномірно розподілена у виділеному об'ємі та є суцільною.

Рівняння руху багатокomпонентних середовищ за умови відсутності фазових переходів проаналізоване Рахматуліним Х.А. [5]. Відповідно до цього методу, при змішуванні декількох компонентів для кожного з них у будь-якій точці простору, де відбувається їх взаємодія, будуть свої значення вектора швидкості, щільності і температури. Для обліку

взаємодії компонентів у процесі змішування вводиться так звана функція взаємодії K . Таким чином, метод дослідження двофазного середовища виходить з того, що рух кожного компонента описується з урахуванням взаємодії між ними.

Система рівнянь досліджуваного явища записується у такий спосіб. Зв'язок між наведеною ρ та справжньою $\dot{\rho}$ густиною становить:

$$\frac{\rho_1}{\dot{\rho}_1} + \frac{\rho_2}{\dot{\rho}_2} = 1, \quad (1)$$

Рівняння нерозривності:

$$d(\rho_1 u_1) = 0, \quad (2)$$

$$d(\rho_2 u_2) = 0.$$

Рівняння руху із урахуванням сил тиску p і взаємодії K :

$$\rho_1 w_1 \frac{du_1}{dx} = -\frac{\rho_1}{\dot{\rho}_1} \frac{dp}{dx} + K(u_2 + u_1), \quad (3)$$

$$\rho_2 w_2 \frac{du_2}{dx} = -\frac{\rho_2}{\dot{\rho}_2} \frac{dp}{dx} + K(u_1 + u_2),$$

де u – швидкість.

Рівняння енергії необхідно скласти для кожного компонента окремо. Для вектора теплопровідності можна записати:

$$q_T = \lambda_i \frac{d^2 T_i}{dx^2}, \quad \text{де } i = 1, 2, \quad (4)$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності компонента.

Тепло, передане шляхом конвективного теплообміну від одного компонента до другого, визначається за виразом:

$$q_k = \alpha \Delta T, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі.

Схожий підхід для дослідження багатокомпонентного середовища було використано Драгановим Б.Х. [6]. У науковій праці [7] представлена математична модель гетерофазного середовища, яка ґрунтується на вираженні осереднення параметрів процесу за інтервалом часу і областю простору. Ще один метод [8] полягає в тому, що ураховується ймовірність об'ємної концентрації i -ої фази у певній точці простору. Для опису плоскої стаціонарної течії двофазного середовища звернемося до системи рівнянь, яка запропонована Селезньовим Л.І. у науковій праці [8]. При цьому приймаються припущення, що обидві фази середовища нестисливі, фазові переходи, зіткнення частинок дисперсної фази і їх дроблення

відсутні. У цьому випадку рівняння нерозривності і руху, записані для кожної фази окремо, мають вигляд:

$$\frac{\partial \varphi_1 u_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_1 v_2}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi_2 u_2}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2 v_2}{\partial y} = 0; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 \varphi_1 \left(u_1 \frac{du_1}{dx} + v_1 \frac{dv_1}{dy} \right) = \\ & = -\frac{\partial \varphi_1 p}{dx} + \varphi_2 \frac{dp}{\partial x} - \frac{3}{8} \frac{C_u}{r} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \rho_1 \varphi_2 - \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (v_1 - v_2) \omega_2 + \\ & + \mu_1 \left[2 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \frac{du_1}{dx} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) \right] + \mu_1 \varphi_1 \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 \varphi_1 \left(u_1 \frac{dv_1}{dx} - v_1 \frac{dv_1}{dy} \right) = \\ & = -\frac{\partial \varphi_1 p}{dy} + \varphi_2 \frac{dp}{\partial y} - \frac{3}{8} \frac{C_v}{r} (v_1 - v_2) |v_1 - v_2| \rho_1 \varphi_2 - \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (u_1 - u_2) \omega_2 + \\ & + \mu_1 \left[2 \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \frac{dv_1}{dy} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) \right] + \mu_1 \varphi_1 \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \rho_2 \varphi_2 \left(u_2 \frac{du_2}{dx} + v_2 \frac{dv_2}{dy} \right) = \\ & = -\varphi_2 \frac{dp}{\partial x} + \frac{3}{8} \frac{C_u}{r} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \rho_1 \varphi_2 + \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (v_1 - v_2) \omega_2; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \rho_2 \varphi_2 \left(u_2 \frac{dv_2}{dx} + v_2 \frac{dv_2}{dy} \right) = \\ & = -\varphi_2 \frac{dp}{\partial y} + \frac{3}{8} \frac{C_v}{r} (v_1 - v_2) |v_1 - v_2| \rho_1 \varphi_2 + \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (u_1 - u_2) \omega_2; \end{aligned} \quad (11)$$

де u , v – компоненти швидкості за координатами x та y ; φ – термодинамічний потенціал фази; ρ – густина; p – тиск; μ – динамічна в'язкість; ω_2 – кутова швидкість обертання частинок дискретної фази; C_i , C_v – коефіцієнти опору, що ураховують сили аеродинамічного опору частинок дискретної фази.

Проекції сил опору представлені третіми членами правої частини рівнянь (8) та (9). Проекції підйомної сили виражені четвертими

членами правої частини рівнянь (8) і (9) і третіми членами в рівняннях (10) та (11). У рівняннях (6)–(11) параметри суцільного середовища позначені індексом 1, а дискретного – індексом 2. Біля стінок розпилювача утворюється прикордонний шар. При цьому біля стінки можуть виникнути газова і рідка плівки. За дискретної структури частинок у градієнтному полі швидкостей виникає обертальний рух дискретної фази. Взаємодія фаз супроводжується перенесенням маси, імпульсу, тепла і призводить до генерації підвищеної турбулентності. Звідси випливає, що структурні особливості двофазного середовища істотно впливають на формування і розвиток прикордонного шару, його відрив, а, отже, на опір обтічних поверхонь. Запишемо рівняння імпульсів для двокомпонентного шару – плівка на обтічній поверхні і газодисперсний шар над нею. Рівняння у формі Прандтля для кожної фази мають вигляд:

$$\frac{\partial u_1^2}{\partial x} - \frac{\partial(u_1 v_1)}{\partial y} = u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \tau_1}{\partial y}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_2^2}{\partial x} - \frac{\partial(u_2 v_2)}{\partial y} = \frac{\rho_1}{\rho_2} u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \tau_2}{\partial y}. \quad (13)$$

У рівняннях (12) та (13) прийнято, що $\frac{dp}{dx} = \rho_1 u_0 \frac{du_0}{dx}$, і передбачається, що параметри на лінії розділу фаз мають розрив.

Рівняння нерозривності для кожної із фаз:

$$\frac{\partial(u_0 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(u_0 v_1)}{\partial y} = u_1 \frac{\partial u_0}{\partial x}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial(u_1 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(u_1 v_2)}{\partial y} = u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad (15)$$

де u_0 – швидкість безперервної фази в початковому перерізі; u_i , v_i – складові швидкості на межі розділу фаз (на зовнішній межі плівки); u_1 , v_1 , u_2 , v_2 – поточні значення складових швидкості в газодисперсному шарі і в плівці.

Після перетворень рівняння імпульсів для прикордонного шару:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} \left(u_0^2 \delta_1^{**} + u_1^2 h^{**} \right) + u_0 \frac{du_0}{dx} \left(\delta_1^* + \frac{\rho_1}{\rho_2} \bar{h} \right) - \\ & - v_{1i} (u_0 - u_i) - \frac{du_i}{dx} \int_0^{\bar{h}} u_2 dy = \frac{\tau_0}{\rho_2} + \tau_i \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

У цьому рівнянні товщина витіснення δ_1^* і товщина втрати імпульсу δ_1^{**} для газодисперсного середовища виражаються співвідношеннями:

$$\delta_1^* = \int_{\bar{h}}^{\delta_1} \left(1 - \frac{u_1}{u_0}\right) dy, \quad \delta_1^{**} = \int_{\bar{h}}^{\delta_1} \frac{u_1}{u_0} \left(1 - \frac{u_1}{u_0}\right) dy. \quad (17)$$

Аналогічні співвідношення для плівки мають вигляд:

$$\bar{h}^* = \int_0^{\bar{h}} \left(1 - \frac{u_2}{u_i}\right) dy, \quad \bar{h}^{**} = \int_0^{\bar{h}} \frac{u_2}{u_i} \left(1 - \frac{u_2}{u_i}\right) dy, \quad (18)$$

$$\int_0^{\bar{h}} \frac{d\tau}{dy} dy = \tau_i - \tau_0, \quad \int_{\bar{h}}^{\delta_1} \frac{d\tau}{dy} dy = -\tau_i, \quad (19)$$

де \bar{h} – середня товщина плівки; τ_0 , τ_i – напруження тертя на стінці і на зовнішньому кордоні плівки, тобто на межі розділу фаз.

Для прикордонного шару координати, що спрямовані за нормаллю до поверхні, змінюються в межах від $y = 0$ до $y = \delta = \bar{h} + \delta_1$.

Конструкцію розпилювача можна вважати досконалою в аеродинамічному відношенні, якщо відсутній відрив прикордонного шару від стінки або якщо область відриву розташована як можливо нижче за течією. Для цього розрахунком визначають місце відриву прикордонного шару. Далі методом послідовного наближення визначають профіль проточної частини розпилювача, що задовольняє вказаним вище вимогам. Розрахунок необхідно доповнити експериментальними дослідженнями, у тому числі методами візуалізації течії [9].

Одним з ефективних прийомів зменшення втрат енергії при розпилюванні є визначення шляхів зниження ступеня нерівномірності поля швидкості в будь-якому перетині розпилювального пристрою. Рівномірність поля швидкості, в свою чергу, значно залежить від плавності переходу від одного перерізу до другого. У зв'язку із цим важливим є питання про забезпечення сполучення різних як завгодно малих ділянок каналу. Для вирішення цього питання звернемося до графоаналітичного методу конструювання поверхонь каналу.

Відповідно до цього методу, елементи перерізів визначаються із графіка площ шляхом перетворення через квадратичну параболу, як однопараметричні. Графіки зміни радіусів рівновеликих перерізів, що забезпечують плавність переходу від перерізу до перерізу, можуть бути визначені розрахунковим шляхом.

При побудові проточної частини установки вважаються заданими: вхідний і вихідний перерізи ділянки, що розглядається; графік зміни площ поперечних перерізів, які розташовані за нормаллю до осі (у загальному випадку вісь є просторовою кривою). Вісь проходить через центри ваги всіх проміжних перетинів.

Послідовність операцій при побудові проточної частини каналів приймається згідно методики, яка подана в праці [10]. Перетворюючи графік площ за допомогою квадратичної параболи, отримують графік радіусів рівновеликих колових перерізів.

На епюрі суміщених перерізів поєднують вхідний і вихідний перерізи проточної частини. Ця дія проводиться за їх центрами ваги і за напрямком головних осей шляхом нанесення радіальних променів. Для кожного променя визначають величини радіусів векторів вхідного ρ_{0j} і вихідного ρ_{nj} перерізів, за допомогою яких розраховують значення коефіцієнтів форми вхідного K_{0j} і вихідного K_{nj} перерізів за такою формулою:

$$K_{0j} = \rho_{0j} / R_0; \quad K_{nj} = \rho_{nj} / R_n, \quad (20)$$

де R_0, R_n – радіуси рівновеликого кола для вхідного і вихідного перерізів.

На осі ділянки розпилювача, що розглядається, вказують точки, через які будуть проходити проміжні перерізи. Після цього, задаючи закон зміни коефіцієнта K уздовж осі, визначають комплекс значень цих коефіцієнтів для кожного із проміжних перерізів:

$$K_{ij} = K_{0j} [1 - (L_j / L)] + K_{nj} (L_j / L), \quad (21)$$

де L – довжина осі; L_j – відстань уздовж осі до відповідного проміжного перерізу.

Помноживши комплекси радіальних коефіцієнтів K_{ij} на величину радіусів рівновеликих кіл для кожного проміжного перетину, отримують комплекси полярних радіусів цих перетинів:

$$\rho_{ij} = K_{ij} R_j. \quad (22)$$

Обчислені значення радіусів-векторів відкладають на відповідних променях на епюрі суміщених перерізів. Отримані дискретні точки з'єднуються плавною кривою, яка є шуканою твірною цього перерізу.

Висновки

Профілювання твірних проточної частини на основі розрахунків прикордонного шару і побудова проточної частини графоаналітичним методом дозволяють сконструювати цей елемент розпилювача аеродинамічно раціональним із мінімізованими характеристиками втрат енергії.

Список посилань

1. Черненко, Є., Каліцький, О., Кондратюк, С. (2006). Все про гербіциди. Агроном, 2, 68–76.
2. Трибель, С.О., Ретьман, С.В., Борзих, О.І., Стригун, О.О. (2012). Стратегічні культури. Фенікс, Колобів, Київ, 368.
3. Борзих, О.І., Круть, М.В. (2019). База даних інноваційних розробок із захисту зернових культур в Україні. Захист і карантин рослин, 65, 3–16.
4. Сушко, І. (2002). Світові тенденції розвитку машин для хімічного захисту рослин. Пропозиція, 6, 95–99.
5. Рахматулин, Х.А. (1956). Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред. Прикладная математика и механика, 20(2), 184–195.
6. Драганов, Б.Х. (1965). К вопросу о движении многокомпонентной сжимаемой среды. Гидроаэромеханика, 2, 2–7.
7. Нигматулин, Р.И. (1978). Основы механики гетерогенных сред. Наука, Москва, 336.
8. Селезнёв, Л.И. (1978). Распределение гидрофазных флуктуаций в двухкомпонентной стабильной системе. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 6, 136–140.
9. Пастушенко, С.І., Міщенко, А.В. (2002). Удосконалення аеродинаміки силосопроводу методами візуалізації течії потоку. Вісник аграрної науки Причорномор'я, Миколаїв, 4(18), 2, 10–15.
10. Драганов, Б.Х., Круглов, М.Г., Обухова, В.С. (1987). Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей. Вища школа, Київ, 175.