

РОДІНКОВ ЮРІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-9033-8361>email: rodinkov.tkr17@gmail.com**САВИЦЬКИЙ АНТОН**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0000-3490-6300>email: savitskyant@gmail.com

ВПЛИВ ВІТРУ НА РІВНОМІРНІСТЬ РОЗПИЛЕННЯ ПЕСТИЦИДІВ ДРОНАМИ

У даному дослідженні розглядається математичне моделювання процесу розпилення пестицидів з використанням дронів з урахуванням впливу вітру на рівномірність розподілу рідини. Аналізуються основні фактори, що впливають на ефективність обприскування, зокрема тиск у форсунці, діаметр сопла, фізичні властивості рідини та швидкість вітру. Окремо розглядається вплив вітру на траєкторію руху крапель та ефективну ширину смуги обробки. Запропонована математична модель дозволяє оцінити зміну кута розпилення в залежності від цих параметрів. Проведено порівняння експериментальних даних з розрахунковими результатами, що підтверджують високу точність моделі. Результати моделювання та експериментів дають змогу визначити критичні порогові значення швидкості вітру, при яких ефективність обприскування знижується, а також оптимізувати процес обробки сільськогосподарських культур.

Ключові слова: розпилення, пестициди, безпілотні літальні апарати, вітровий дрейф, кут розпилення, форсунки.

RODINKOV YURI**SAVITSKYI ANTON**

Vinnytsia National Technical University

THE IMPACT OF WIND ON THE UNIFORMITY OF PESTICIDE SPRAYING IN FIELD TREATMENT USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

The paper presents an in-depth mathematical modeling of the pesticide spraying process using unmanned aerial vehicles (UAVs), focusing on the impact of wind on the uniformity and efficiency of liquid distribution. The use of UAVs in agriculture has become widespread due to their capability for precise and targeted application of agrochemicals. However, environmental factors such as wind introduce significant challenges by altering droplet trajectories and causing non-uniform spraying and chemical drift. This study systematically analyzes the main operational and environmental parameters affecting spraying efficiency, including nozzle pressure, nozzle orifice diameter, the physical properties of the sprayed liquid (density, viscosity, surface tension), flight altitude, and the characteristics of ambient wind. Special emphasis is placed on the aerodynamic interactions between droplets and wind flows, which result in droplet displacement, changes in droplet velocity vectors, and distortion of the spray cone angle.

A detailed mathematical model is proposed to predict these effects. The model is based on solving the system of differential equations describing droplet motion under the combined influence of gravitational and aerodynamic drag forces, with the wind velocity vector acting as a dynamic external perturbation. Analytical expressions are derived for estimating the deformation of the spray pattern and the effective treatment swath under varying wind conditions. The results provide a scientific basis for the development of adaptive UAV-based spraying systems that can dynamically adjust flight parameters (altitude, speed, nozzle settings) in response to real-time wind measurements. This approach offers significant potential for improving pesticide application efficiency, reducing environmental contamination, and supporting the sustainable intensification of agricultural practices within the framework of precision farming technologies.

Keywords: spraying, pesticides, unmanned aerial vehicles, wind drift, spray angle, nozzles.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 30.04.2025

Вступ

У сучасному точному землеробстві ефективне та рівномірне нанесення пестицидів є критично важливим для захисту рослин і підвищення врожайності. Традиційно для обприскування культур застосовувалися наземні обприскувачі та авіація, але останніми роками стрімко зростає використання безпілотних авіаційних систем (дронів) для цих задач. Дрони мають низку переваг: знижують контакт оператора з хімікатами, можуть працювати на важкодоступних ділянках і нерівному рельєфі, забезпечують високоточне внесення при малих об'ємах робочої рідини. Однак виникає проблема забезпечення рівномірності розпилення та мінімізації зносу пестицидів вітром.

Математична модель та безрозмірні параметри

Розпилення рідини через форсунку в двофазним потоком, що складається з рідких крапель та повітря. Струм, що виходить із сопла, розширюється під кутом розпилення α , який залежить від таких основних параметрів:

- Тиск у форсунці P – чим вищий тиск, тим більша швидкість розпилення частинок і ширший кут розпилення.
- Діаметр сопла D – визначає розмір крапель та їхню динаміку.
- Фізичні властивості рідини – густина ρ , динамічна в'язкість η , поверхневий натяг σ впливають на стабільність та рівномірність розпилення.
- Швидкість вітру W – може змінювати напрямок руху частинок та деформувати конус розпилення.

Щоб описати залежність кута розпилення α від основних параметрів, застосуємо метод розмірного аналізу. Введемо безрозмірні комплекси:

$$P_1 = \frac{D\vartheta}{v}, P_2 = \frac{p}{\rho\vartheta^2}, P_3 = \frac{\sigma}{\rho\vartheta^2 D}, P_4 = \frac{W}{\vartheta} \quad (1)$$

З урахуванням цих змінних отримаємо функціональну залежність:

$$\alpha = k \cdot P_1^a \cdot P_2^b \cdot P_3^c \cdot P_4^d \quad (2)$$

або в спрощеному вигляді:

$$\alpha = k \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^x \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^y \cdot \left(\frac{W}{W_0}\right)^z \quad (3)$$

Початкові експериментальні дані дозволяють визначити оптимальні значення коефіцієнтів:

$$x = 0.5, \quad y = -0.2, \quad z = -0.3 \quad (4)$$

На основі серії експериментів було визначено оптимальні значення коефіцієнтів для заданих умов розпилення. При урахуванні цих коефіцієнтів модель набуває вигляду, що дозволяє кількісно оцінити вплив вітру.

Таблиця 1

Залежність зміни кута розпилення від швидкості вітру

Швидкість вітру, м/с	Відхилення кута розпилення, %
0-2	$\leq 5\%$
3-5	5-15%
6-8	15-30%
>8	>30%

Як видно з таблиці, помірний вітер до 2 м/с практично не впливає на ширину розпилення. При вітрі середньої сили 3-5 м/с кут розпилення зменшується на 5-15%, а при більших швидкостях втрати покриття перевищують 30%. Таким чином, модель показує негативну рентабельність використання проведення обприскування при вітрі на понад ~5 м/с, оскільки ефективність значно знижується.

Отримавши математично змодельовані залежності, варто проаналізувати їх наслідки для практичного обприскування. Головний негативний ефект – дрейф крапель та нерівномірність покриття вздовж смуги обробки.

Результати моделювання та експериментальної частини

Розроблена математична модель була розглянута шляхом порівняння з експериментальними даними розпилення у польових умовах. В ході експериментів було виміряно фактичний кут розпилення форсунки при різних швидкостях штучно створеного вітру. Зокрема, було проведено серію тестів, де варіювалася швидкість вітру від 0 до 8 м/с, що дозволило оцінити її вплив на рівномірність покриття при різних умовах.

Отримані дані підтвердили прогноз моделі: зі збільшенням швидкості вітру W кут розпилення α поступово зменшується. У разі слабого вітру (до 2 м/с) зміни були незначними, а рівномірність покриття залишалася високою. Однак при швидкості вітру понад 5 м/с спостерігалася помітна зменшення кута розпилення, що призводило до зниження ефективності обприскування.

Підтвердження експериментальними даними теоретичних засад склало $R=0.955$, що свідчить про високу точність моделі. Це дозволяє використовувати модель для подальших оцінок і оптимізації процесу розпилення. Зокрема, модель дає змогу прогнозувати вплив вітрових умов на ефективність обприскування та оптимізувати налаштування обладнання (наприклад, вибір типу форсунки або налаштування швидкості дронів).

На основі моделі були визначені порогові значення швидкості вітру W , при яких рівномірність розпилення погіршується більш ніж на 10%, 20%, 30% тощо. Визначені пороги показали, що при швидкості вітру понад 5 м/с ефективність обприскування значно знижується.

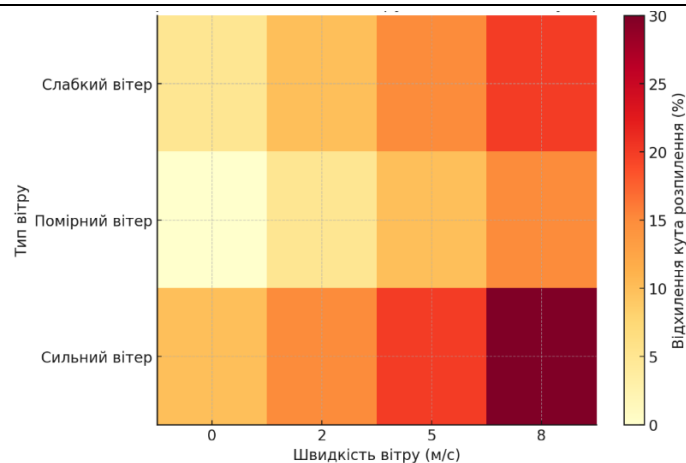


Рис. 1. Теплова карта впливу швидкості вітру на відхилення кута розпилення

○ При швидкості вітру 0–2 м/с— відхилення кута розпилення не перевищує 5%, що забезпечує високий рівень покриття.

○ При швидкості вітру 3–5 м/с— відхилення кута розпилення становить 5-15%, що вже може помітно вплинути на точність нанесення.

○ При швидкості вітру 6–8 м/с— відхилення кута розпилення може досягати 15-30%, що призводить до значних втрат покриття та зменшення ефективності захисту.

○ При швидкості вітру понад 8 м/с — втрати покриття можуть перевищувати 30%, що робить обприскування в таких умовах малоефективним.

Ефективність розпилення пестицидів дронами суттєво знижується за наявності вітрових збурень, що призводить до нерівномірності покриття та зносу крапель за межі цільової зони. Використання методів штучного інтелекту для адаптивного керування процесом розпилення дозволяє мінімізувати негативний вплив вітру і підвищити точність агрохімічної обробки. Наукова новизна запропонованого підходу полягає у розробці комплексної математичної моделі руху крапель у вітровому середовищі, впровадженні прогнозування вітрових умов із використанням глибинних нейронних мереж та оптимізації керування польотом дрона через алгоритми навчання з підкріплення.

Траєкторія краплі описується системою диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\frac{dv}{dt} = g + \frac{1}{m} (F_d + F_w) \quad (5)$$

де v – вектор швидкості краплі; g – прискорення вільного падіння; F_d – сила аеродинамічного опору; F_w – сила вітру.

Для прогнозування змін швидкості та напрямку вітру застосуємо глибинну нейронну мережу типу Long Short-Term Memory (LSTM), що дозволяє здійснювати короткостроковий прогноз розвитку вітрової обстановки і завчасно адаптувати параметри польоту дрона:

$$\hat{W}(t + \Delta t) = LSTM(X_t) \quad (6)$$

Рівномірність обробки формується у рамках навчання з підкріплення. (Reinforcement Learning, RL) - це підхід машинного навчання, в якому агент навчається приймати послідовні рішення шляхом взаємодії із середовищем. На кожному кроці агент спостерігає стан середовища, виконує дію, отримує винагороду і оновлює свою стратегію для максимізації накопиченої винагороди в майбутньому. Метою агента є максимізація очікуваного результату:

$$\max_{\pi} E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \right] \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт дисконтування.

Стан середовища визначається вектором:

$$s = (h, v, \theta, W, x, y) \quad (8)$$

де h – висота, v – швидкість дрона, θ – кут розпилення, W – локальні характеристики вітру, x, y – координати на полі.

Агенти приймають дії спрямовані на зміну параметрів польоту та розпилення.

$$a = (\Delta h, \Delta v, \Delta \theta, \Delta \text{витрата}) \quad (9)$$

Функція винагороди (Reward Function) визначається як:

$$R = - \int_{\Omega} (C(x, y, t) - C_{\text{задане}}(x, y))^2 dx dy - \lambda \cdot \text{Втрати} \quad (10)$$

де $C(x, y, t)$ – фактична концентрація пестицидів, $C_{\text{задане}}(x, y)$ – цільове покриття, λ – ваговий коефіцієнт штрафу за дрейф.

Навчання агентів здійснюється із застосуванням алгоритмів Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), Twin Delayed DDPG (TD3) або Proximal Policy Optimization (PPO), що забезпечує побудову стабільної політики керування $\pi(s) \rightarrow a$.

У стандартних алгоритмах навчання з підкріплення функція винагороди є фіксованою і не враховує змін у навколишньому середовищі. Проте у випадку обприскування полів дронами вітрові умови істотно впливають на ефективність нанесення пестицидів. У разі сильного вітру дрон має приділяти більшу увагу рівномірності покриття, навіть за рахунок деякого збільшення витрат препарату.

З метою підвищення стійкості поведінки агента в умовах змінного вітру запропоновано адаптивну функцію винагороди, коефіцієнти якої залежить від поточної швидкості вітру.

Математична модель адаптивної винагороди

Функція винагороди на кожному кроці часу визначається як:

$$r_t = -a(|W_t|) \int_{\Omega} (C(x, y, t) - C_{\text{задане}}(x, y))^2 dx dy - \beta(|W_t|) \cdot \text{Втрати} \quad (11)$$

де $a(|W_t|)$, $\beta(|W_t|)$ – вагові коефіцієнти, що адаптивно змінюються в залежності від сили вітру.

Запропоновано змінювати ці коефіцієнти за наступними законами:

$$\begin{aligned} a(|W_t|) &= a_0(1 + k_a|W_t|), \\ \beta(|W_t|) &= \beta_0(1 + k_\beta|W_t|). \end{aligned} \quad (12)$$

де β_0 , a_0 – базові вагові коефіцієнти, k_a , k_β – коефіцієнти чутливості до вітру.

Таким чином, за сильного вітру агент сильніше штрафується за нерівномірність нанесення пестицидів (підвищення α) і менше штрафується за перевитрату препарату (зниження β).

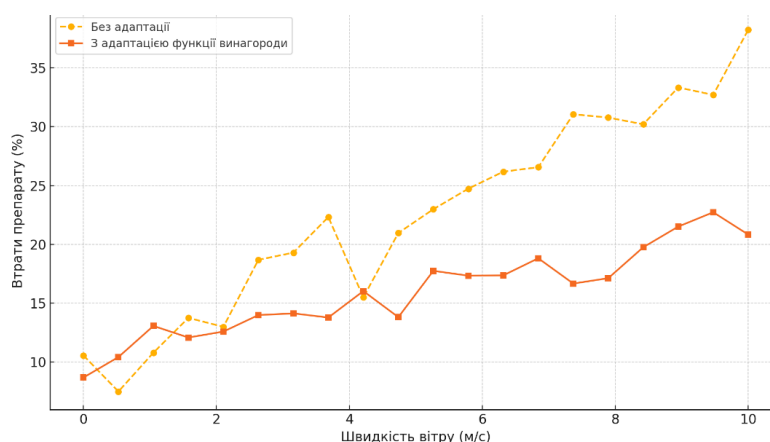


Рис. 2. Залежність втрат препаратів від швидкості вітру

Дані, отримані шляхом симуляційного моделювання втрат препарату на основі типових залежностей втрат від швидкості вітру. Значення сформовано шляхом генерації штучних вибірок із додаванням випадкових збурень для імітації реальних умов розпилення.

Висновки

Вплив вітру є одним із ключових чинників, що визначають рівномірність і ефективність розпилення пестицидів. Проведений аналіз показав, що для дронів вплив вітру проявляється як у звуженні факела розпилення, так і в зносі частини крапель за межі цільової зони. Математична модель, побудована на основі безрозмірного аналізу, дозволяє кількісно оцінити зміну кута розпилення α залежно від швидкості вітру W та інших параметрів. Згідно з моделлю і експериментальними даними, при швидкості вітру понад ~ 5 м/с рівномірність нанесення пестициду різко погіршується: ефективна ширина смуги зменшується на 15% і більше, а втрати препарату можуть перевищувати 20–30%. Це підтверджує необхідність врахування метеорологічних умов при плануванні обприскування. Запропонована комплексна модель адаптивного розпилення пестицидів із використанням методів штучного інтелекту дозволяє істотно підвищити рівномірність покриття оброблюваних площ, мінімізувати втрати пестицидів через дрейф і підвищити екологічну безпеку процесу обприскування.

Отримані результати мають практичне значення для впровадження інтелектуальних систем точного землеробства.

Література

1. Левицький В. М. Гідравлічні форсунки та їх застосування у сільському господарстві. – К. : Агропромвидав, 2008. – 256 с.
2. ISO 5682-1:2017. Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 1: Test methods for sprayer nozzles. – International Organization for Standardization, 2017. – 21 с.
3. Wu H., Zhu H., Zhou Y. Effect of wind on droplet drift and distribution in agricultural spraying applications // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2020. – Vol. 36, № 1. – P. 15–26.
4. Chen P., Douzals J. P., Lan Y., et al. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: a review // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – Art. 870956. – DOI: 10.3389/fpls.2022.870956.
5. Semenišin M., Steponavičius D., Kemzūraitė A., Savickas D. Optimizing UAV spraying for sustainability: different system spray drift control and adjuvant performance // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, № 5. – P. 2083. – DOI: 10.3390/su17052083.

References

1. Levytskyi V. M. Hidravlični forsunki ta yikh zastosuvannia u silskomu hospodarstvi. – K. : Ahropromvydav, 2008. – 256 s.
2. ISO 5682-1:2017. Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 1: Test methods for sprayer nozzles. – International Organization for Standardization, 2017. – 21 s.
3. Wu H., Zhu H., Zhou Y. Effect of wind on droplet drift and distribution in agricultural spraying applications // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2020. – Vol. 36, № 1. – P. 15–26.
4. Chen P., Douzals J. P., Lan Y., et al. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: a review // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – Art. 870956. – DOI: 10.3389/fpls.2022.870956.
5. Semenišin M., Steponavičius D., Kemzūraitė A., Savickas D. Optimizing UAV spraying for sustainability: different system spray drift control and adjuvant performance // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, № 5. – P. 2083. – DOI: 10.3390/su17052083.