УДК 631.348

МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ПОВІТРЯНО-РІДИННОГО ПОТОКУ В КРОНІ ВИНОГРАДНОГО КУЩА ПРИ ОБПРИСКУВАННІ

Сєра К.М.*, к.т.н.,
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ
Степанов А.В., д.т.н.
Кримський федеральний університет ім. В.І. Вернадського, м. Сімферополь
*Тел. (044) 527-88-95

***Анотація* – пропонується математична модель процесу поширення повітряно-рідинного потоку, яка основана на гіпотезі про турбулентну дифузію дисперсної суміші у певному об’ємі. Побудова такої моделі має значну актуальність при моделюванні процесів обприскування рослин.**

***Ключові слова* – математична модель процесу поширення повітряно-рідинного потоку, турбулентна дифузія, дисперсна суміш, обприскування рослин.**

Постановка проблеми. Теоретичний опис процесів, що відбуваються у кроні рослин під час обприскування, дотепер недостатньо обґрунтований навіть враховуючи чисельні дослідження в цій області.

Аналіз останніх досліджень. У розрахунках процесів обприскування в якості робочої і найбільш поширеної гіпотези прийнята теорія розпаду струменя ідеальної (нев'язкої) рідини, внаслідок його нестійкості під дією малих випадкових коливань. Хоча ця теорія і узгоджується з експериментальними даними, але придатна для опису тільки ламінарних потоків, тобто стабільних тонких струменів, що мають відносно невисоку швидкість.

При цьому, як зазначено у [6], розвиток теорії досі не призвів до переконливого кількісного аналізу процесів розпилення рідини при невпорядкованому турбулентному русі рідини і середовища, а також до створення прийнятних методів розрахунку розпилювальних пристроїв обприскувачів.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Розробити теоретичну модель поширення повітряно-рідинного потоку в певному об’ємі для розрахунку параметрів технологічного процесу обприску-

---

вання на основі турбулентної дифузії частинок робочої рідини у кроновому просторі. Представити чисельну реалізацію моделі з використанням сіткових методів.

Основна частина. В основі моделі, що пропонується, покладена гіпотеза про те, що частинки рідини при проходженні крізь кроновий простір куща, затримуються і осідають. При цьому газовий потік розділяється на чистий газ і осад. Сам процес можна розглядати як фільтрування суспензії через проникну перегородку.

При моделюванні повітряно-рідинного потоку у кроні, прийнято вважати його двофазним струменем, тобто сумішшю газу (повітря) з дрібними частинками рідини. Вважають, що рух рідини у потоці в цілому підпорядкований законам руху повітря.

Відповідно до теорії фільтрування [7], існує два механізми уловлювання крапель на проникній перегородці: дифузія і інерційне осадження (перехоплювання). Для оптимального обприскування повинні одночасно відбуватися обидва процеси. Турбулентна дифузія, в принципі, відповідає цим двом умовам і далі буде розглядатися, як основний механізм поширення повітряно-рідинного потоку при обприскуванні.

Запропонована модель розглядається у застосуванні до процесів обприскування виноградних кущів. Під час поступального руху обприскувача уздовж міжрядь виноградника, потік змінює напрямок. Тоді сумарна швидкість потоку складається з відносної швидкості потоку створеного вентилятором, і поступальної швидкості руху агрегату.

Дослідження [1] показали, що оптимальним кутом подачі повітряно-рідинного потоку слід вважати кут, що дорівнює 75° від напрямку руху. У цьому випадку поступальний рух агрегату гальмує рух повітряно-рідинного струменя, що сприяє відхиленню потоку в бік куща наближаючи кут атаки до прямолінійного (90°). Це, у свою чергу, скорочує шлях крапель і сприяє кращому проникненню рідини в крону куща.

Приймаємо, що виноградну рослину вписано в паралелепіпед, що має об’єм Ω (рис.1). Процес проникнення розпилених крапель в цей об’єм в певному наближенні представимо рівнянням дифузії.

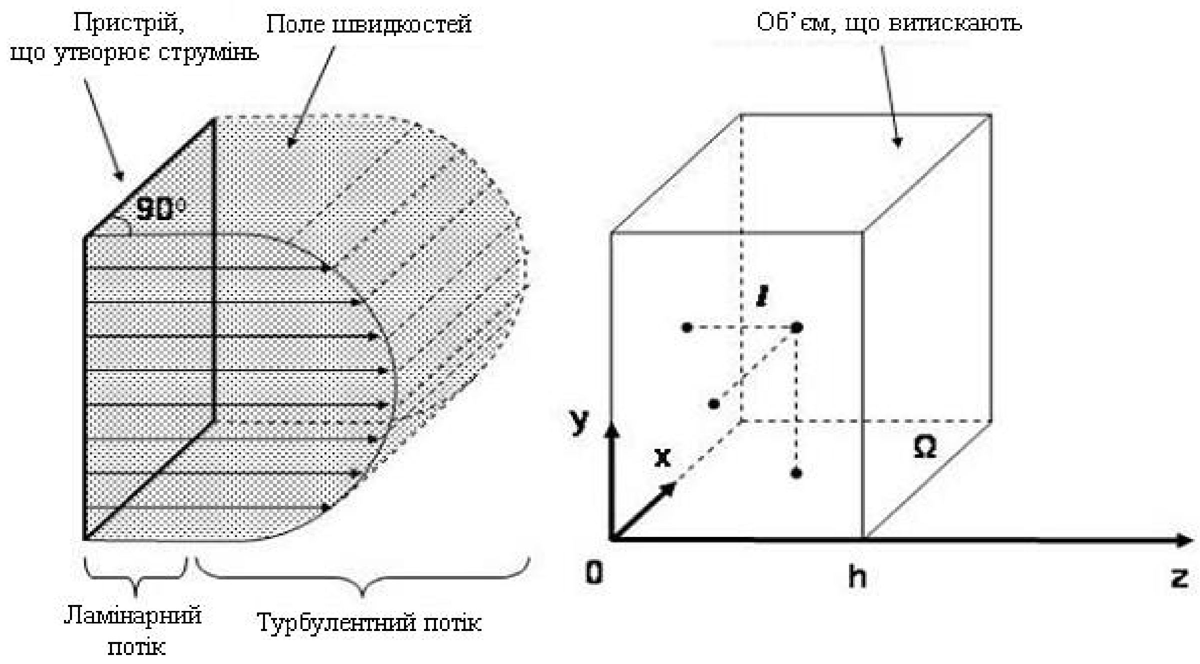

Рис. 1. Схема процесу проникнення

Глибина проникнення $h = h(t)$ – це функція часу t. Переходячи до безрозмірною перемінної $\xi = \frac{z}{h}$, в перемінних ξ і t рівняння турбулентної дифузії можна представити у вигляді

$$\grave{a}(\tilde{n},\rho)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{h^2}\cdot\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial\xi}\right) + \grave{a}(c,\rho)\frac{dh}{dt}\cdot\frac{\xi}{h}\cdot\frac{\partial T}{\partial\xi} - \\ -\grave{a}(c,\rho)\frac{1}{h}\frac{\partial h_0}{\partial t}\cdot\frac{\partial T}{\partial\xi} - \frac{1}{h}\cdot\frac{\partial S}{\partial\xi} + M, \qquad (1)$$

де c - коефіцієнт диффундування; ρ - щільність;

λ - коефіцієнт, пов'язаний зі швидкістю заповнення об'єму;

T - концентрація;

$\frac{\partial h_0}{\partial t}$ - швидкість прирощення шару;

S - потік;

M - облік впливу перемішування на концентрацію по напрямку осі Oz [5].

Для розрахунку потоку в об'ємі застосовується експоненціальна залежність

$S(\xi) = S(0)\exp(-\alpha h \xi)$,

де α - коефіцієнт ослаблення.

Параметризація на основі рівняння для кінетичної енергії турбулентності і швидкості її дисипації. Коефіцієнт турбулентної дифузії λ

може бути визначений таким чином [4]:

$$\lambda = c\rho k, \tag{2}$$

де k – коефіцієнт турбулентності;

$$k = C_{\xi}\frac{E^2}{\varepsilon}. \tag{3}$$

Кінетична енергія турбулентності

$$E = \frac{1}{2}\sqrt{\dot{u} + \dot{v} + \dot{w}}\ .$$

Турбулентна енергія E і швидкість її дисипації ε [4]

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E}{\partial t} = \dfrac{\alpha_E}{h^2}\dfrac{\partial}{\partial \xi}k\dfrac{\partial E}{\partial \xi} + \dfrac{\xi}{h}\dfrac{\partial h}{\partial t}\dfrac{\partial E}{\partial \xi} + p - \varepsilon \\[2ex] \dfrac{\partial E}{\partial t} = \dfrac{\alpha_\varepsilon}{h^2}\dfrac{\partial}{\partial \xi}k\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \dfrac{\xi}{h}\dfrac{\partial h}{\partial t}\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + C_1\dfrac{\varepsilon}{E}\left(p - \varepsilon\right), \end{cases} \tag{4}$$

де α_E і α_ε – безрозмірні величини; C_1- функція числа Рейнольдса Re:

$$C_1 = \frac{C_0}{1 + \dfrac{0{,}69\left(2 - C_0\right)}{\sqrt{\mathrm{Re}}}}, \quad \mathrm{Re} = \frac{\left(\dfrac{2E}{3}\right)^2}{\nu\varepsilon},$$

тут ν- молекулярна в'язкість суміші (хімікат + повітря);

$C_0 = \mathrm{const}$.

Визначимо граничні умови. Для складових вектора швидкості потоку на поверхні $\xi = 0$ матимемо наступні залежності:

а) Безперервність потоку імпульсу. Напруженість тертя по Ox і Oy в правих частинах

$$-\frac{\rho k}{h}\frac{\partial U}{\partial \xi}\bigg|_{\xi=0} = \tau_x,$$

$$-\frac{\rho k}{h}\frac{\partial V}{\partial \xi}\bigg|_{\xi=0} = \tau_y;$$

б) Умова прилипання в прикордонному шарі: $u\big|_{\text{г}} = v\big|_{\text{г}} = 0$.

Додатково $E\big|_{\xi=0} = \dfrac{C_\tau}{\rho}\tau_a$,

де C_τ- безрозмірний коефіцієнт;

τ_a - модуль напруженості тертя потоку уздовж осі Oz.

$$E\Big|_г = \frac{C_\tau}{\rho}\tau_b ,$$

$$\tau_b = \frac{\rho k}{h}\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \xi}\right)^2} .$$

Граничні умови для ε можуть бути отримані з граничних умов для E і визначаються за формулою

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{E^{2/3}}{l} .$$

Тоді шлях зміщення (масштаб турбулентності):

$$l\sqrt{E} = k = C_\varepsilon \frac{E^2}{\varepsilon},$$

$$l = C_\varepsilon \frac{E^{3/2}}{\varepsilon} .$$

Чисельна реалізація може бути здійснена за наступним алгоритмом [3]:

1) Складемо рівняння дифузії в кінцевих різностях

$$c\rho\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\left(h^j\right)^2}\cdot\frac{T_{i+1}^{j+1} - 2T_i^{j+1} + T_{i-1}^{j+1}}{\left(\Delta\xi\right)^2} + c\rho\frac{\Delta h}{\Delta t}\cdot\frac{\xi}{h^j}\cdot\frac{T_{i+1}^{j+1} - T_{i-1}^{j+1}}{2\Delta\xi} - \tag{5}$$
$$-c\rho\frac{\Delta h_0}{\Delta t}\cdot\frac{1}{h^j}\cdot\frac{T_{i+1}^{j+1} - T_{i-1}^{j+1}}{2\Delta\xi} - \frac{1}{h}\cdot\frac{\partial S^j}{\partial\xi};$$

2) Апроксимація рівняння для турбулентної енергії і швидкості її дисипації має вигляд

$$\delta_{\bar t} E_i^{j+1} = \frac{\alpha_E}{h^j}\delta_\xi\left(k_i^{j+1}\delta_{\bar\xi}E_i^{j+1}\right) + \frac{\xi_i}{h^j}\delta_{\bar t}h^{j+1}\delta_\xi E_i^{j+1} + P_i^{j+1} - \varepsilon_i^{j+1},$$

$$\delta_{\bar t}\varepsilon_i^{j+1} = \frac{\alpha_\varepsilon}{h^j}\delta_\xi\left(k_i^{j+1}\delta_{\bar\xi}E_i^{j+1}\right) + \frac{\xi_i}{h^j}\delta_{\bar t}h^{j+1}\delta_\xi\varepsilon_i^{j+1} + C_{li}^{j+1}\frac{\varepsilon_i^{j+1}}{E_i^{j+1}}\left(P_i^{j+1} - \varepsilon_i^{j+1}\right),$$

$$P_i^{j+1} = \frac{k_i^{j+1}}{h^j}\left[\left(\delta_\xi u_i^{j+1}\right)^2 + \left(\delta_\xi v_i^{j+1}\right)^2 - \frac{g}{\rho}\delta_\xi\rho_i^j\right],$$

$$k_i^{j+1} = C_\varepsilon\frac{\left(E_i^{j+1}\right)^2}{\varepsilon_i^{j+1}},$$

$$\delta_{\bar l}\left(\cdot\right)_i^{j+1} = \frac{\left(\cdot\right)_i^{j+1} - \left(\cdot\right)_i^j}{\Delta t}, \qquad \delta_\xi\left(\cdot\right)_i^{j+1} = \frac{\left(\cdot\right)_{i+1}^{j+1} - \left(\cdot\right)_i^{j+1}}{\Delta\xi}, \tag{6}$$

$$\delta_{\bar{\xi}}(\cdot)_i^{j+1} = \frac{(\cdot)_i^{j+1} - (\cdot)_{i-1}^{j+1}}{\Delta\xi}, \qquad \delta_{\xi}(\cdot)_i^{j+1} = \frac{(\cdot)_{i+1}^{j+1} - (\cdot)_{i-1}^{j+1}}{2\Delta\xi};$$

3) На кожному кроці рішення перших двох рівнянь визначиться методом прогонки;

4) Визначають швидкості u_i^{j+1} і v_i^{j+1} до моменту вирішення рівнянь (6):

$$\delta_{\bar{t}}u_i^{j+1} = \frac{\alpha_E}{h^j}\delta_{\xi}\left(k_i^j\delta_{\bar{\xi}}u_i^{j+1}\right) + \frac{\xi_i}{h^j}\delta_{\bar{t}}h^{j+1}\delta_{\xi}u_i^{j+1},$$

$$\delta_{\bar{t}}v_i^{j+1} = \frac{\alpha_E}{h^j}\delta_{\xi}\left(k_i^j\delta_{\bar{\xi}}v_i^{j+1}\right) + \frac{\xi_i}{h^j}\delta_{\bar{t}}h^{j+1}\delta_{\xi}u_i^{j+1};$$

5) Після визначення E_i^{j+1} і ε_i^{j+1} за формулою (3) і (2) знаходиться коефіцієнт турбулентної дифузії λ_i^{j+1}. Як видно, дана схема є повністю неявній відносно величин E і ε. Це забезпечує її сталість. У той же час, в силу її нелінійності, рішення шукається за допомогою ітераційного процесу.

Висновки. Запропонована модель дозволить визначити концентрацію речовини (отрутохімікату) в точках кронового простору куща. Наведений алгоритм вирішення розглянутої задачі дозволяє здійснити чисельну реалізацію для кожного конкретного випадку обприскування виноградників. Результати можуть бути використані для проектування вихідних параметрів повітряно-рідинного потоку і пристрою обприскувача, що утворює повітряний струмінь.

Література:

1. *Болбочан Е.К.* Определение оптимального угла атаки воздушно-жидкостного потока при встрече с виноградным кустом / *Е.К. Болбочан* // Садоводство, виноградарство и виноделие Молдавии. – 1968. – №2. – С. 49-50.

2. *Заїка П.М.* Теорія сільськогосподарських машин. Т. 1 (ч. 4). Машини для захисту рослин від шкідників і хвороб / *П.М. Заїка*. – Харків: Око. – 272 с.

3. *Лебедев В.И.* Функциональный анализ и вычислительная математика / *В.И. Лебедев*. – М.: Физматлит, 2005. – 296 с.

4. *Лыкосов В.Н.* О проблеме замыкания моделей турбулентного пограничного слоя с помощью уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации / *В.Н. Лыкосов* // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. – 1992. – Т. 28. - С. 696-704.

5. *Монин А.С.* Статистическая гидромеханика (механика турбулентности). Ч. 1 / *А.С. Монин, А.М. Яглом*. – М.: Наука, 1965. – 640 с.

6. *Войтюк Д.Г.* Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку / *Д.Г. Войтюк* [та ін.]; за ред. Д.Г.Войтюка. - К.: Вища

освіта, 2005. - 464 с.

7. *Страус В.* Промышленная очистка газов / *В. Страус*. - М.: Химия, 1981. - 604 с.

8. *Shnaydman V.A.* Two-equation turbulence closure for quantitative description of boundary layers / *V.A. Shnaydman* // Research activities in atmospheric and oceanic modeling / Edited by H. Ritchie. - April 2002. - Report No. 32.

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНО-ЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В КРОНЕ ВИНОГРАДНОГО КУСТА ПРИ ОПРЫСКИВАНИИ

Серая Е.М., Степанов А.В.

Аннотация – **предлагается математическая модель процесса распространения воздушно-жидкостного потока, основанная на гипотезе о турбулентной диффузии дисперсной смеси в некотором объеме. Построение такой модели имеет значительную актуальность при моделировании процессов опрыскивания растений.**

A MATHEMATICAL MODEL OF THE AIRBLAST SPRAYING PROCESS IN THE VINEYARDS

C. Syera, A. Steparnov

Summary

A paper presents a mathematical model of the airblast spraying based on a hypothesis of the turbulent diffusion of dispersed mixture in a volume. The model is important at the modeling plant spraying.