

УДК 632.982. 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСІДАННЯ КРАПЛІ ЗМІННОЇ МАСИ У ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ

Войтюк Д.Г

Онищенко В.Б

Онищенко Б.В

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Усовершенствована математическая модель движения капель переменной массы, как тела, вращающегося под действием воздушного потока с градиентом скорости и получены закономерности разрушения и осаждения капель рабочей жидкости в зависимости от скорости ветра при ступенчатой регулировке дисперсности распыления в полевом опрыскиватели.

Improved mathematical model of variable mass drops as the body that rotates under the action of air flow with velocity gradient and obtained demolition and settlement patterns of fluid droplets depending on the wind speed at the step regulation of spray dispersion in the field sprayers.

Постановка проблеми

Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва та широке впровадження механізованих технологій вирощування польових культур вимагає раціонального використання хімічних засобів захисту рослин. Значне різноманіття ґрунтово-кліматичних умов, метеорологічних факторів, забрудненість полів багатьма видами бур'янів, великий набір культурних рослин і багато інших факторів обумовлюють необхідність впровадження сучасних машин для захисту рослин, а особливо з можливістю регулювання в ході робочого процесу таких важливих параметрів, як витрата робочої рідини та її дисперсність.

Одним з технічних рішень, що сприяє вирішенню цих проблем, є створення і впровадження у виробництво розпилювальних пристроїв, що забезпечують ступеневе регулювання дисперсності розпилення у процесі виконання обприскування сільськогосподарських культур для підвищення ефективності роботи обприскувача, що є актуальним народногосподарським завданням.

Аналіз останніх досліджень

П.М. Заїка в своїх працях [1] склав диференційні рівняння руху краплини та інтегрував їх. При цьому одержав залежності для швидкості, переміщення і часу руху краплини. Недоліком цієї моделі є відсутність бокового повітряного потоку, а також те що краплина має початкову швидкість рівну нулю.

В роботах О.І. Мележика [2] побудована математична модель руху і випаровування краплин. Дана система диференційних рівнянь враховує і боковий вітер, і випаровування краплини, і градієнт швидкості вітру по висоті. Але не враховує силу Магнуса та підйомну силу, яка виникає при градієнті швидкості вітру.

Ф.Г. Зуєв в [3] склав систему диференційних рівнянь руху частинки в трубі, а Поліщук В.М. в [4] використав її для визначення руху краплини в розпилювачі типу сопла Вентурі.

Дана система диференціальних рівнянь враховує і боковий вітер, і градієнт швидкості вітру і сили, які виникають при цьому градієнті, але в закритому просторі каналу типу сопла Вентурі.

Тому, проаналізувавши всі переваги та недоліки теоретичних моделей, виникає потреба у складанні системи диференціальних рівнянь, яка б враховувала і випаровування краплини, і змінну по висоті швидкість вітру, і сили, які виникають при потраплянні краплини в повітряний потік з градієнтом швидкості, у відкритому просторі, коли краплина вилітає з розпилювача і осідає на поверхні рослин.

Формування цілей статті

Ціллю статті є:

Отримати математичну модель руху краплин змінної маси, як тіла, що обертається під дією повітряного потоку з градієнтом швидкості та закономірності знесення і осідання краплин робочої рідини залежно від швидкості вітру при ступеневому регулюванні дисперсності розпилення в польовому обприскувачі.

Результати дослідження

Осідання краплі на рослину моделювали в процесі аналізу її силової взаємодії у гравітаційному полі з урахуванням повітряного потоку. На краплю діє сила ваги mg (рис. 1) та сила аеродинамічного опору повітря F_B . При цьому приймали степеневий закон впливу зміни швидкості повітря V_B за висотою Z . Крім того на краплю, яка рухається в рухомому повітряному середовищі діє бокова сила, яка виникає у двох випадках: при наявності градієнта швидкості $grad_Z v$ потоку, що обтікає частку (F_{II}) та під час обертання частки, яка обтікається потоком (F_M).

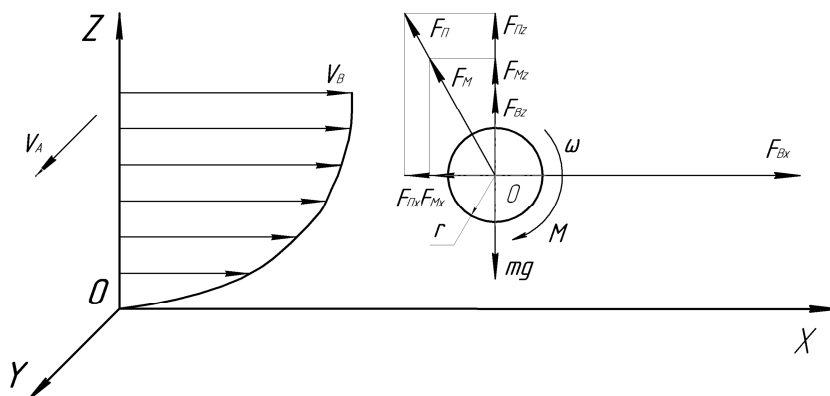


Рис. 1. Схема сил, які діють на краплю, що опускається в повітряному середовищі.

Величина цих сил для плоско-паралельного потоку, відповідно до теореми М. Є. Жуковського, пропорційна відносній швидкості потоку, що набігає, і циркуляції. Вплив швидкості повітряного потоку на швидкість зменшення радіуса r краплі, за рахунок випаровування, визначали на основі формули Фреслінга.

Тоді рівняння руху краплі змінної маси можна записати у вигляді поєднання рівнянь динаміки руху та формули Фреслінга:

$$\begin{cases} \frac{d(m\bar{u})}{dt} = \bar{F}_B + \bar{F}_\Pi + \bar{F}_M + m\bar{g}; \\ \frac{d(J\omega)}{dt} = M; \\ \frac{dr}{dt} = -\left(\frac{D}{\rho_p \cdot r}\right) \cdot (C_0 - C_1) \cdot \left(1 + 0.276 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}}\right), \end{cases} \quad (1)$$

де m – маса краплини, кг; F_B , F_Π , F_M – сила аеродинамічного опору повітря, підйомна сила, сила Магнуса, Н; ω – кутова швидкість обертання краплини, рад/с; D – коефіцієнт дифузії, м²/с; C_0 – концентрація парів на поверхні рідини, кг/м³; C_1 – концентрація парів рідини в навколишньому середовищі, кг/м³; ρ_p – густина рідини, кг/м³; Re – число Рейнольдса; Sc – число Шмідта.

Проекції сил F_Π і F_M на осі координат визначаються з таких залежностей:

$$F_{\Pi x} = \frac{8}{25} \rho_n \pi r^3 \frac{V_B}{h^{\frac{6}{25}} z^{\frac{19}{25}}} |U_z|, \quad (2)$$

$$F_{\Pi z} = \frac{8}{25} \rho_n \pi r^3 \frac{V_B}{h^{\frac{6}{25}} z^{\frac{19}{25}}} \left[V_B \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right], \quad (3)$$

$$F_{Mx} = \frac{8}{3} \rho_n \pi r^3 U_z \omega, \quad (4)$$

$$F_{Mz} = \frac{8}{3} \rho_n \pi r^3 \omega \left[V_B \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right], \quad (5)$$

де r – радіус краплини, м; ρ_n – густина повітря, кг/м³; V_B – швидкість вітру, м/с; h – ви розташування розпилувачів, м; U_x , U_z – проекції швидкості краплини на вісь x та z , м/с.

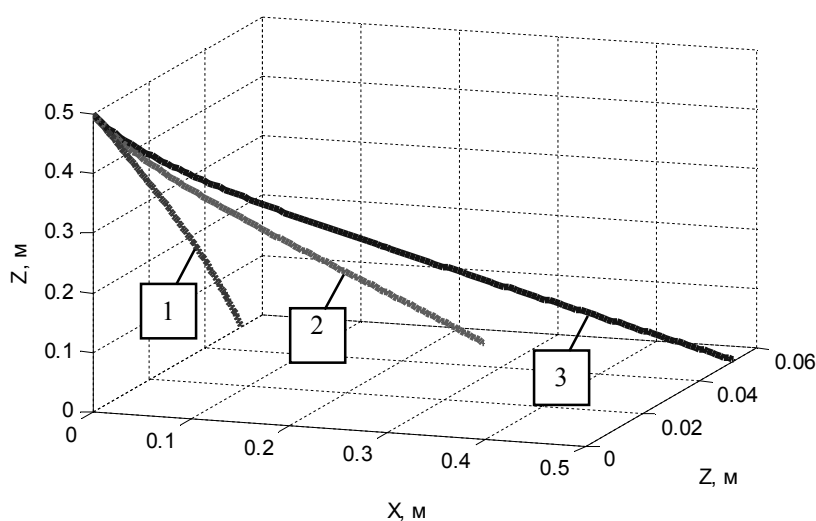


Рис. 2. Траєкторія руху краплин $d = 298$ мкм:

1 – $V_B = 0$; 2 – $V_B = 2.5$ м/с; 3 – $V_B = 5$ м/с.

Зважаючи на викладене, рівняння руху краплини змінної маси, яка здійснює обертовий рух при надходженні в повітряному потоці з градієнтом швидкості в проекціях на осі просторової системи координат матиме такий вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dU_x}{dt} &= \frac{\frac{1}{8} \rho_n c \sqrt{\left[V_B \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right]^2 + U_y^2 + U_z^2} \left[V_B \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right] - \frac{8}{100} \rho_n r \frac{V_B}{h^{\frac{6}{25}} r^{\frac{19}{25}}} |U_z| - \frac{8}{12} \rho_n r U_z \omega}{\rho_p} - U_x \frac{dr}{dt}; \\ \frac{dU_y}{dt} &= \left(\frac{3}{8} \rho_n c \sqrt{\left[V_B \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right]^2 + U_y^2 + U_z^2} U_y - 3U_y \rho_p \frac{dr}{dt} \right) \frac{1}{r \rho_p}; \\ \frac{dU_z}{dt} &= \frac{\frac{8}{100} \rho_n r \frac{V_B}{h^{\frac{6}{25}} r^{\frac{19}{25}}} \left[V_B \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right] + \frac{8}{12} \rho_n r \omega \left[V_B \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right] + \frac{1}{8} \rho_n c |U_z| \sqrt{\left[V_B \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right]^2 + U_y^2 + U_z^2} - \frac{1}{3} r \rho_p g}{\rho_p} - U_z \frac{dr}{dt}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{0,097 \rho_n c \frac{(h-z)}{h+r} \left[V_B \left(\frac{z}{h} \right)^{\frac{6}{25}} - U_x \right]^2 - \frac{8}{3} \rho_p r \omega \frac{dr}{dt}}{\frac{8}{15} \cdot r^2 \cdot \rho_p}; \\ \frac{dr}{dt} &= - \left(\frac{D}{\rho_p r} \right) (C_0 - C_1) \left(1 + 0,276 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}} \right) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Для вирішення системи нелінійних диференціальних рівнянь (6) користуємось чисельним методом Рунге-Кутта з кроком дискретизації 0,001 с за умови, коли V_B направлена під кутом 90^0 до V_a .

Початкові дані для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь:

$$U_0 = 18 \text{ м/с}; \varphi = 60 \% ; T = 20^{\circ} \text{C}; h = 0,5 \text{ м}; V_B = 0 - 5 \text{ м/с}; d = 170 - 426 \text{ мкм};$$

$$\omega = 0 \text{ рад/с}; V_a = 2,2 \text{ м/с}.$$

На основі аналізу рівнянь руху краплини змінної маси (6) встановлено основні закономірності зміни траєкторії руху краплини (рис. 2) і швидкості осідання краплини U_z (рис. 3), зміну кутової швидкості обертання ω та кількості обертів N краплини з моменту вильоту до досягнення поверхні рослини (рис. 4), при цьому N знаходиться в межах від 0,1 (для краплин $d = 426$ мкм при $V_B = 2,5$ м/с) до 10,1 (для $d = 170$ мкм при $V_B = 5$ м/с), відповідно ω змінюється від 0 до 16 та 1733 (рад/с).

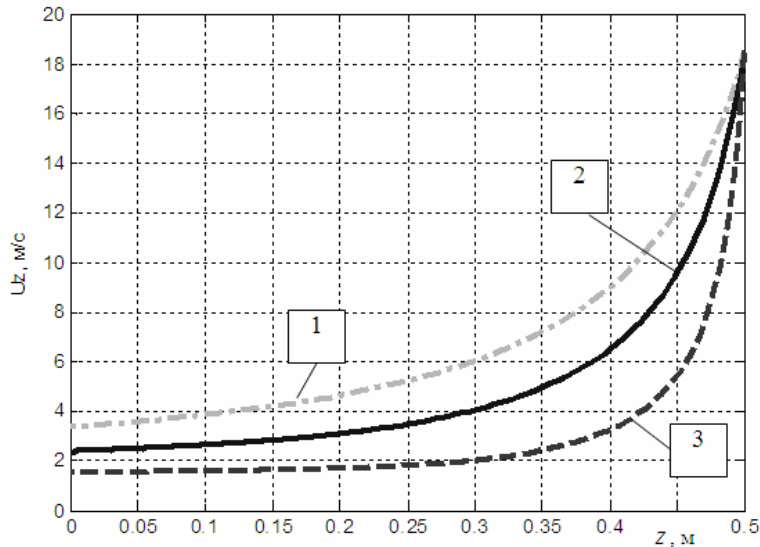


Рис. 3. Швидкість осідання U_z краплин залежно від висоти z при $V_B = 2,5$ м/с: 1, 2, 3 – d відповідно 426 мкм; 298 мкм; 170 мкм.

Встановлено, що обертовий рух краплини не суттєво впливає на відстань її знесення, або відстань S_x між точкою виходу краплини з розпилювача до точки її осідання в напрямку вектора швидкості V_B у горизонтальній площині (рис. 5).

Встановлено, що знесення краплин робочої рідини S_x залежно від зміни швидкості вітру V_B і діаметра краплин d знаходиться в межах від 0 до 1 м для краплин діаметром $d = 170...426$ мкм і швидкості вітру $V_B = 0$ та краплин діаметром $d = 170$ мкм і швидкості вітру $V_B = 5$ м/с відповідно.

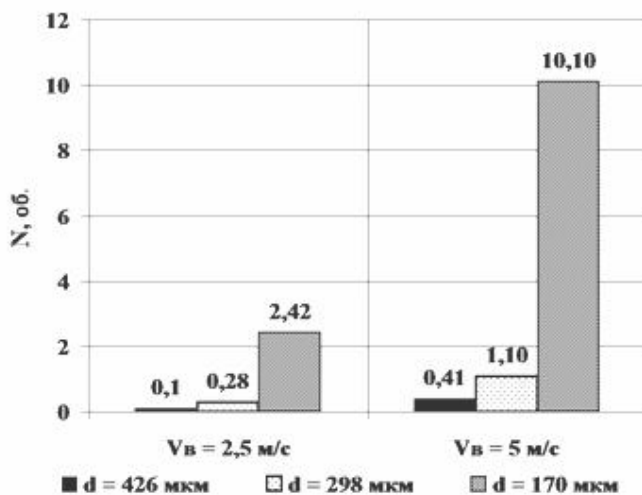


Рис. 4. Діаграма кількості обертів краплини N з моменту вильоту до досягнення поверхні рослини

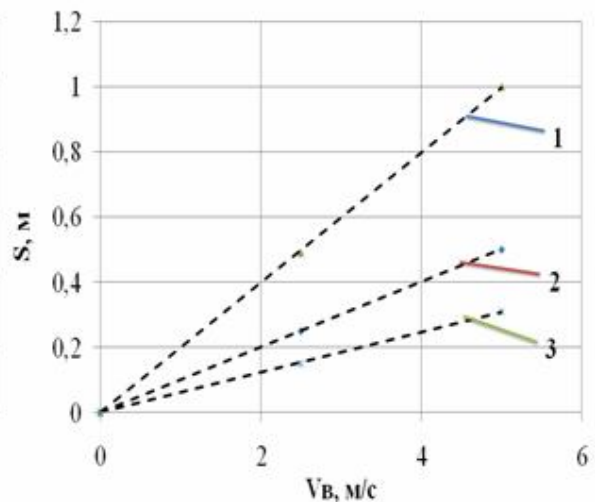


Рис. 5. Залежність зміни S_x від V_B при $V_\alpha = 2,2$ м/с: 1, 2, 3 – d відповідно 170 мкм; 298 мкм; 426 мкм

Висновки

1. Встановлено, що обертовий рух краплини не суттєво впливає на відстань її знесення. Кількість обертів краплини з моменту вильоту до досягнення поверхні рослини знаходиться в межах від 0,1 для краплин діаметром 426 мкм при швидкості вітру 2,5 м/с до 10,1 для краплин діаметром 170 мкм при швидкості вітру 5 м/с.

2. Встановлено, що знесення краплин робочої рідини S_x залежно від зміни швидкості вітру V_B і діаметра краплин d знаходиться в межах від 0 до 1 м для краплин діаметром $d = 170 \dots 426$ мкм і швидкості вітру $V_B = 0$ та краплин діаметром $d = 170$ мкм і швидкості вітру $V_B = 5$ м/с відповідно.

Література

1. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. – Харків: Око, 2002. – Т. 1 (Ч. 4). – 272 с.
2. Мележик О.І. Покращення дисперсності розпилення пестицидів: Дис. ... канд. техн. наук. / Дніпропетровськ. – 180 с.
3. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1976. – 344 с.
4. Поліщук В.М. Обґрунтування параметрів пневмогідролічної системи дозування і подачі робочої рідини в обприскувачах. Дис. канд. техн. наук. / Г.: ІМЕСГ 2005. – 180 с.