

ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВНЕСЕННЯ РІДКИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

*В. Б. Онищенко, кандидат технічних наук
І. С. Любченко, аспірантка*
e-mail: lub4enko11@mail.ru*

Анотація. На сьогодні однією з перспективних технологій внесення добрив є технологія внесення рідких добрив обприскувачем польових культур. Для позакореневого живлення використовують достатньо концентровані розчини хімічних сполук, що активно впливають на рослини. Будь-яка помилка може призвести до порушення фізіологічних процесів, що відбувається у рослині, до опіків листя і втрати врожаю. Проведений огляд теоретичних досліджень процесу руху, випаровування та осідання краплин робочої рідини. Розглянуто математичну модель руху краплин змінної маси під дією повітряного потоку з градієнтом швидкості, закономірності знесення і осідання краплин робочої рідини залежно від швидкості вітру. Рішення моделі руху краплі змінної маси у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь дозволяє визначити основні параметри процесу осідання крапель під дією повітряного потоку. Проведений огляд показав, що автори не враховували рух краплин рідких мінеральних добрив, у повітряному просторі. Розмір краплин має становити >503 мкм, так як менші краплі затримуються на рослинах та спричиняють опіки. Отримані у роботі результати можуть у подальшому бути використані для уточнення і вдосконалення способів внесення добрив.

Ключові слова: *краплини робочої рідини, випаровування, осідання, знесення, теоретичні дослідження*

Постановка проблеми. На сьогодні однією з перспективних технологій внесення добрив є технологія внесення рідких добрив обприскувачем польових культур. Для позакореневого живлення ми використовуємо достатньо концентровані розчини хімічних сполук, що активно впливають на рослини. Будь-яка помилка може призвести до порушення фізіологічних процесів, що відбувається у рослині, до опіків листя і втрати врожаю.

Американська спільнота інженерів у сільському господарстві та біології (ASABE) розробила стандарт ASABE S572 для виміру та інтерпретації якості розпилу з наконечника. У стандарті використовується вісім категорій крапель, шість з яких прийняті для сільського господарства [7]. Для рідких добрив рекомендовано

*Науковий керівник – кандидат технічних наук В. Б. Онищенко

© В. Б. Онищенко, І. С. Любченко, 2016

використовувати краплі надзвичайно великого (503-665 мкм) та ультра великого (>665 мкм) розміру.

Аналіз останніх досліджень. Питанням знесення, випаровування і відкладення краплин робочої рідини присвячені роботи О. С. Барановського, В. А. Бородіна, І. Н. Велецького, Д. Г. Войтюка, В. Ф. Дунського, І. П. Масла, О. І. Малєжика, Б. В. Онищенко, В. М. Поліщука, В. А. Саніна, Ю. А. Спірідонова, Ж. М. Судіта, І. І. Сушка, М. К. Тарновича, С. Д. Шеруда та ін.

М. П. Заїка в своїх працях [1] склав диференційні рівняння руху краплини та інтегрував їх. При цьому одержав залежності для швидкості, переміщення і часу руху краплини.

Результати досліджень. Осідання краплини можна моделювати рухом падаючого тіла в середовищі з опором. Спочатку розглянемо вплив опору повітря на рух краплини, що падає на землю, в нерухомому повітряному середовищі (рис. 1). Зроблено припущення, що краплина вагою $G = mg$ падає вертикально вниз у повітрі з деякої висоти (точки O) з початковою швидкістю, яка дорівнює нулю. Точку O взято за початок координат, при чому вісь ox цієї системи координат спрямовуємо вниз. Крім сили ваги на краплю діє також сила опору повітря R_c .

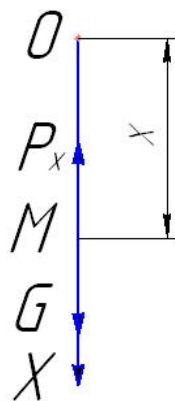


Рис. 1. Сили, які діють на краплину, що опускається вертикально вниз в середовищі з опором.

Диференційне рівняння руху краплини записали у такому вигляді:

$$m\ddot{x} = mg - R_c, \quad (1)$$

де: m – маса краплини.

Початкові умови руху мали такий вигляд:

$$\text{при } t_0=0, x_0=0. \quad (2)$$

Сила опору повітря пропорційна другому ступені швидкості руху краплини:

$$R_c = k^2 G v^2, \quad (3)$$

де: $v = x'$ – швидкість руху краплі, k – коефіцієнт опору ($k > 0$).

У результаті інтегрування диференційного рівняння (1) при початкових умовах (3) і з урахуванням (4) одержано вираз для швидкості, переміщення і часу руху в такому вигляді:

$$V = \frac{1}{k} \cdot \frac{1 - e^{-2kgt}}{1 + e^{-2kgt}}, \quad (4)$$

$$S = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{e^{\sqrt{g\alpha}t} + e^{-\sqrt{g\alpha}t}}{2}, \quad (5)$$

$$t = \frac{1}{2\sqrt{g\alpha}} \ln \frac{\sqrt{g} + v\sqrt{\alpha}}{\sqrt{g} - v\sqrt{\alpha}}, \quad (6)$$

де: $\alpha = k^2 \cdot g$.

Недоліком цієї моделі є відсутність бокового повітряного потоку, а також те що краплина має початкову швидкість рівну нулю.

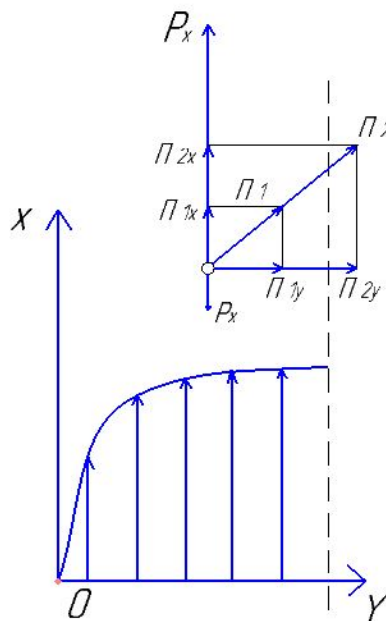


Рис. 2. Схема сил, що діють на краплину під час її польоту в вертикальному каналі.

В роботах О. І. Малежика [3] побудована математична модель руху і випаровування краплин.

Рівняння руху краплини в проекціях на осі координат x , y , z :

$$\frac{dV_{xijk}}{dt} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C_{ijk} \cdot \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} (V_{xijk} - U_x) \cdot |V - U|_{ijk} \quad (7)$$

$$\frac{dV_{yijk}}{dt} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C_{ijk} \cdot \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} (V_{yijk} - U_y) \cdot |V - U|_{ijk} \quad (8)$$

$$\frac{dV_{zijk}}{dt} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C_{ijk} \cdot \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} (V_{zijk} - U_z) \cdot |V - U|_{ijk} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} d_{ijk} = 2 - \frac{\beta_{ijk}}{\rho} (\rho_H^\theta - \rho_{в.п.}) \quad (10)$$

де: β_{ijk} – коефіцієнт масовіддачі краплини, ρ_H^θ – густина насиченої водяної пари біля краплини, $\rho_{в.п.}$ – густина водяної пари в атмосфері.

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 [2] склав систему диференційних рівнянь руху частинки в трубці, а В. М. Поліщук в [5] використав її для визначення руху краплини в розпилювачі типу сопла Вентурі.

Рівняння руху краплини в вертикальному каналі [2]:

$$M_k \frac{dv_k}{dt} = P_x + P_g + \Pi_1 + \Pi_2, \\ J \frac{dw}{dt} = M_c, \quad \frac{dx}{dt} = v_{k,x}, \quad \frac{dy}{dt} = v_{k,y}, \quad \frac{d\psi}{dt} = w. \quad (11)$$

Підставивши в (11) вирази, що описують сили:

- сила аеродинамічного опору $P_x = C_k A_k [(\rho \bar{v}^2)/2]$;

де: C_k – коефіцієнт аеродинамічного опору частинки; A_k – площа меделевого перетину, m^2 ; ρ – густина повітря, kg/m^3 ; v – швидкість повітряного потоку, m/s .

- сила тяжіння $P_g = M_k g$;

де: M_k – маса краплини, kg ; g – прискорення вільного падіння, m/s^2 .

- Π_1 підйомна сила, що виникає при наявності градієнта швидкості потоку;

- Π_2 сила яка зумовлена силою Магнуса, а також врахувавши те, що момент сили визначається як $M_c = a \cdot P_x$, де плече сил відносно центра мас знаходиться за формулою $a = 0,125 R_k \cdot [(r_0 - y)/(r_0 - R_k)]$.

Остаточні рівняння руху в проекціях на осі координат x, y :

$$M_k \frac{dv_k}{dt} = \frac{1}{2} \pi \rho_\Gamma R_k^2 C_k \left[v_{\Gamma, max} \left(\frac{y}{r_0} \right)^{1/7} - v_{k,x} \right] \left| \left[v_{\Gamma, max} \left(\frac{y}{r_0} \right)^{1/7} - v_{k,x} \right] \right| \\ + \frac{4}{21} \pi \rho_\Gamma R_k^3 \frac{v_{g, max}}{r_0^{1/7} y^{6/7}} v_{k,y} + \frac{8}{3} \pi \rho_\Gamma R_k^3 w v_{k,y} + M_k g \cdot \sin(-\theta) \\ M_k \frac{dv_y}{dt} = \frac{1}{2} \pi \rho_\Gamma R_k^2 C_k v_{k,y} |v_{k,y}| + \frac{4}{21} \pi \rho_\Gamma R_k^3 \frac{v_{g, max}}{r_0^{1/7} y^{6/7}} \left[v_{\Gamma, max} \left(\frac{y}{r_0} \right)^{1/7} - v_{k,x} \right] \\ + \frac{8}{3} \pi \rho_\Gamma R_k^3 w \left[v_{\Gamma, max} \left(\frac{y}{r_0} \right)^{1/7} - v_{k,x} \right] + M_k g \cdot \cos \theta \quad (12) \\ J \frac{dw}{dt} = 0,0625 \pi \rho_\Gamma R_k^3 \frac{r_0 - y}{r_0 - R_k} C_k \left[v_{\Gamma, max} \left(\frac{y}{r_0} \right)^{1/7} - v_{k,x} \right] \left| \left[v_{\Gamma, max} \left(\frac{y}{r_0} \right)^{1/7} - v_{k,x} \right] \right| \\ \frac{dx}{dt} = v_{k,x} \quad \frac{dy}{dt} = v_{k,y} \quad \frac{d\psi}{dt} = w.$$

Перші члени правої частини перших двох рівнянь визначають силу аеродинамічного опору P_{1x} , другі і треті відповідно сили Π_1 і Π_2 , четверті – силу тяжіння P_g . Наведена система нелінійних диференційних рівнянь описує рух краплини в потоці, що обмежений координатами $0,5R_x \leq y \leq r_0$. Якщо краплина потрапляє в іншу

половину потоку, деякі сили змінюють свій напрямок: напрямок дії сили P_x у будь якій точці потоку збігатиметься із напрямком потоку; при координаті центра мас краплини $y > r_0$ напрямок складових Π_{1x} і Π_{1y} бокової сили змінюється; тому в рівнянні (12) перед виразами для цих сил знак повинен бути змінений на протилежний; проекція сили Π_{2x} змінює знак при зміні напрямку кутової швидкості чи знаку проекції відносно швидкості на вісь Y , а проекція сили Π_{2y} змінює знак при зміні знаку w ; напрямок моменту при значенні $y > r_0$ змінюється на протилежний; напрямок сили опору що діє у здовж осі Y , визначається знаком v_y ; залежність (12) в поперечному перерізі трубопроводу справедлива тільки до значення $y = r_0$, тому при розв'язанні системи рівнянь (12), якщо $y > r_0$, необхідно замість y при вибраній системі координат підставляти значення $y_i = r_0 - \Delta y_i$, де y_i – відстань від осі до потоку центра мас краплини [2]. Дана система диференціальних рівнянь враховує і боковий вітер, і градієнт швидкості вітру і сили, які виникають при градієнті, але в закритому просторі каналу типу сопла Вентурі. Онищенко Б. В. [4] розробив модель руху краплі змінної маси у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь, рішення якої дозволяє визначити основні параметри процесу осідання крапель під дією повітряного потоку.

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

$$\begin{aligned} \frac{dU_x}{dt} &= \frac{\frac{1}{8}\rho_n c \sqrt{\left[V_B\left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x\right]^2 + U_y^2 + U_z^2} \left[V_B\left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x\right] - \frac{8}{100}\rho_n r \frac{V_B}{h^{\frac{6}{25}} r^{\frac{19}{25}}} |U_z| - \frac{8}{12}\rho_n r U_z \omega}{\rho_p} - U_x \frac{dr}{dt}; \\ \frac{dU_y}{dt} &= \left(\frac{3}{8}\rho_n c \sqrt{\left[V_B\left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x\right]^2 + U_y^2 + U_z^2} U_y - 3U_y \rho_p \frac{dr}{dt} \right) \frac{1}{r\rho_p}; \\ &\quad \frac{8}{100}\rho_n r \frac{V_B}{h^{\frac{6}{25}} r^{\frac{19}{25}}} \left[V_B\left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x\right] + \frac{8}{12}\rho_n r \omega \left[V_B\left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x\right] + \\ &\quad + \frac{1}{8}\rho_n c |U_z| \sqrt{\left[V_B\left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x\right]^2 + U_y^2 + U_z^2} - \frac{1}{3}r\rho_p g \\ \frac{dU_z}{dt} &= \frac{-U_z \frac{dr}{dt}}{\rho_p} - \frac{1}{3}r; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{0,097\rho_i c \frac{(h-z)}{h+r} \left[V_A\left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{6}{25}} - U_x\right]^2 - \frac{8}{3}\rho_\delta r \omega \frac{dr}{dt}}{\frac{8}{15} \cdot r^2 \cdot \rho_\delta}; \\ \frac{dr}{dt} &= -\left(\frac{D}{\rho_p r}\right) (C_0 - C_1) \left(1 + 0,276 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}}\right) \end{aligned} \tag{13}$$

Висновок. Проведений аналіз показав, що автори не враховували рух краплин рідких мінеральних добрив у повітряному просторі від розпилювача до рослин та особливість їх розподілу по поверхні рослинного покриву.

Список літератури

1. *Заїка М. П.* Теорія сільськогосподарських машин / *М. П. Заїка.* – Харків: Око, 2002. – Т. 1 (Ч. 4). – 272 с.
2. *Зуєв Ф. Г.* Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / *М. П. Заїка.* – М.: Колос, 1976. – 344 с.
3. *Малежика О. І.* Покращення дисперсності розпилення пестицидів : дис. канд. техн. наук / *О. І. Малежика.* – Дніпропетровськ: ДДАУ, 2009. – 180 с.
4. *Онищенко В. Б.* Обґрунтування розпилювального пристрою обприскувача з ступеневим регулюванням дисперсності розпилення : дис. канд. техн. наук / *В. Б. Онищенко.* – К.: НУБіП України, 2011. – 168 с.
5. *Поліщук В. М.* Обґрунтування параметрів пневмогідролічної системи дозування робочої рідини в обприскувачах : дис. канд. техн. наук / *В. М. Поліщук.* – Глеваха: ІМЕСГ, 2005. – 180 с.
6. *Hypro.* Каталог насосов, наконечников для распыления и аксессуаров. НУР 01RU/Hypro EU Limited. – Cambridge 2013. – 180 с.
7. *ASABE S572.1 Droplet Size Classification.*

References

1. *Zayika, M. P.* (2002). *Teoriya sil's'kohospodars'kykh mashyn* [Theory of agricultural machines]. Kharkiv: Oko, T. 1 (Ch. 4), 272.
2. *Zuyev, F. H.* (1976). *Pnevmatycheskoe transportyrovanye na zernopererabatyvayushchykh predpriyatyakh* [Pneumatic transportation of grain handling companies]. M.: Kolos, 344.
3. *Malezhyka, O. I.* (2009). *Pokrashchennya dyspersnosti rozpylennya pestytsydiv* [Improving the dispersity of spraying pesticides] : dys. kand. tekhn. nauk. Dnipropetrovs'k: DDAU, 180.
4. *Onyshchenko, V. B.* (2011). *Obhruntuvannya rozpylyval'noho prystroyu obpryskuvacha z stupenevym rehulyuvannyam dyspersnosti rozpylennya* [Rationale the spray device sprayer with adjustable steps, the dispersion of the spray] : dys. kand. tekhn. nauk. K.: NUBiP Ukrainy, 168.
5. *Polishchuk, V. M.* (2005). *Obhruntuvannya parametriv pnevmohidravlichnoyi systemy dozuvannya robochoyi ridyny v obpryskuvachakh* [Justification of parameters pneumohydraulic system of the working fluid sprayers] : dys. kand. tekhn. nauk. Hlevakha: IMES·H, 180.
6. *Hypro.* (2013). *Kataloh nasosov, nakonechnykov dlya raspylenyya y aksessuarov.* НУР 01RU/Hypro EU Limited. Cambridge, 180.
7. *ASABE S572.1 Droplet Size Classification.*

ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ВНЕСЕНИЯ ЖИДКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

В. Б. Онищенко, И. С. Любченко

Аннотация. *Сегодня одной из перспективных технологий внесения удобрений является технология внесения жидких удобрений опрыскивателем полевых культур. Для внекорневой подкормки используют достаточно концентрированные*

растворы химических соединений, которые активно влияют на растения. Любая ошибка может привести к нарушению физиологических процессов, которые происходят в растении, к ожогам листьев и потери урожая. Проведен обзор теоретических исследований процесса движения, испарения и оседания капель рабочей жидкости. Рассмотрена математическая модель движения капель переменной массы под действием воздушного потока с градиентом скорости, получены закономерности сноса и осадки капель рабочей жидкости в зависимости от скорости ветра. Решение модели движения капель переменной массы в виде нелинейных дифференциальных уравнений позволяет определить основные параметры процесса оседания капель под действием воздушного потока. Проведенный обзор показал, что авторы не учитывали движение капель жидких минеральных удобрений, в воздушном пространстве. Размер капель должен составлять >503 мкм, так как меньшие капли задерживаются на растениях и вызывают ожоги. Полученные в работе результаты могут в дальнейшем быть использованы для уточнения и совершенствования способов внесения удобрений.

Ключевые слова: *капли рабочей жидкости, испарения, оседания, снос, теоретические исследования*

REVIEW OF THEORETICAL STUDIES OF PROCESS OF LIQUID MINERAL FERTILIZERS

V. B. Onishchenko, I. S. Lyubchenko

Abstract. *Today one of the most advanced technology is application of liquid fertilizer by sprayer. For top-dressing are using concentrated solutions of chemical compounds that actively affect the plant. Any error may affect the physiological processes that occurs in the plant, burns the leaves and crop losses. There was conducted a review of theoretical research process of movement, evaporation and deposition of drops. Considered mathematical model of variable mass drops under the action of air flow with velocity gradient and obtaining demolition and settlement patterns of fluid droplets depending on the wind speed. The decision of model motion drop of variable mass in the form of nonlinear differential equations can determine the main parameters of subsidence drops under air flow. The review showed that the authors didn't consider the motion of drops of liquid fertilizer in the airspace. Size droplets should be > 503 microns, because smaller droplets trapped on the plants and cause burns. Obtained in the results can subsequently be used to refine and improve methods of fertilization.*

Key words: *fluid droplets, evaporation, deposition, demolition, theoretical research*