УДК 621.324 DOI 10.31548/energiya3(73).2024.132

АНАЛІЗ РУХУ ЧАСТИНОК АЕРОЗОЛЮ В КАНАЛІ ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО ДИСКОВОГО РОЗПИЛЮВАЧА

В. О. Грищенко, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор

Подільський державний аграрно-технічний університет

E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. *У сучасному сільському господарстві виникає потреба у вдосконаленні технологій захисту рослин, дезінфекції повітря, вакцинації тварин і птиці, а також у зволоженні та іонізації повітря в приміщеннях. Електроаерозольний спосіб обробки виявляється дієвим, але для його широкого застосування необхідно розробити різноманітні установки для генерації заряджених аерозолів. Однією з головних труднощів є створення джерел заряджених частинок різних концентрацій, які б забезпечували керованість процесу розпилювання та заряджання аерозолю. Комбінація електростатичного розпилювання з іншими методами, такими як пневматичне і механічне розпилення, показує значні можливості підвищення ефективності процесу. Результати експериментів підтверджують ефективність електростатичного розпилювання, але для широкого впровадження потрібно дослідження комбінованих методів та розробка відповідних технологій та технічних засобів управління процесом. Роботи з аналізу досліджень та публікацій показують перспективність застосування електроаерозольних технологій у сільському господарстві, а також вказують на необхідність подальшого розвитку та вдосконалення цих методів. Оцінка можливостей та доцільності використання комбінованого способу генерації та стабілізації аерозолів шляхом математичного моделювання траєкторій руху частинок аерозолю. Використання математичного моделювання для визначення руху частинок аерозолю в електричних полях. Розвиток технології електроаерозольного оброблення є актуальним та перспективним напрямком для сільськогосподарського виробництва, проте для ефективного використання необхідно подальше дослідження та розвиток комбінованих методів та технологій.*

Ключові слова: ***аерозоль, електричне поле, пневмоканал, відцентровий розпилювач, рух частинки***

Актуальність. Для широкого застосування електроаерозольного способу обробки в сільськогосподарському виробництві необхідне створення різноманітних електроаерозольних установок (генеруючих заряджені аерозолі), які

використовують для захисту рослин, дезінфекції повітря в приміщеннях, вакцинації тварин і птиці. зволоження і іонізації повітря в приміщеннях. Для кожного виду електроаерозольної обробки необхідно мати різні розміри частинок аерозолю.

Основна трудність полягає у створенні джерела заряджених частинок різних концентрацій розчинів, які б забезпечували можливість керованості процесу розпилювання і зарядження отриманого аерозолю відповідно до їх функціонального призначення.

Значні можливості підвищення ефективності електростатичного розпилювання має комбінація з іншими методами, такими як пневматичне і механічне. При цьому елементарні струмені та краплини в процесі розпилу подають у пневматичні потоки, які рухаються в області сильного електричного поля. При накладені електричного поля на розпилювану рідину утворений двофазний потік стає більш дрібнодисперсними і монодисперсними, ніж отриманий тим же способом без накладення електричного поля.

Ефективність електростатичного розпилювання рідини для отримання аерозольного потоку заряджених частинок визначено результатами експериментів і практикою застосування. Але пошук комбінованих способів формування і використання електроаерозольних потоків у практиці сільського господарства є досить актуальним і своєчасним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розробки установок електронно-іонної технології, визначенню доцільності та ефективності їх використання в агропромисловому виробництві, зокрема застосування електрогазодинаміки дисперсних систем для захисту рослин, вакцинації тварин присвячено достатня кількість публікацій, висвітлених у роботах [1-4]. Питання використання електростатичного розпилювання рідини для підвищення ефективності різних технологій висвітлені в роботах [5-6]. Подальший розвиток електроаерозольних технологій в системах створення технологічного мікроклімату отримав у роботах [7-8]. Аналізом наукових розробок і публікацій встановлено перспективність застосування електростатичного розпилювання води для охолодження повітря виробничих приміщень [3,7,9]. Але відсутність технологій і

технічних засобів управління електроаерозольними процесами стримує подальший розвиток електротехнологічних процесів їх впровадження у виробництво.

Мета дослідження – виявити можливості та оцінка доцільності використання комбінованого способу генерації та стабілізації аерозолів шляхом математичного моделювання траєкторій руху частинок аерозолю.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження руху частинки аерозолю в процесі заряджання в електричних полях зводиться до визначення руху центра мас матеріальної точки під дією прикладених до частинки сил. Задача дослідження – визначення середньої траєкторії руху частинки, без врахування деталей поведінки частинки.

Відповідно до другого закону Ньютона рух частинки визначається рівнянням:

$$m\frac{dv}{d\tau} = \sum \overline{F}_i ,$$

де m – маса частинки; v – швидкість частинки; τ – час; $\sum F$ – сума сил, що діють на частинку.

Прийнято, що частинка рідини (краплина) має форму сфери, не деформується і не обертається під час руху/

Частинка аерозолю отримує електричний заряд в електричному полі коронного розряду і вводиться в повітряний канал, утворений двома циліндричними електродами, під'єднаними до високовольтного джерела постійного струму (рис. 1). Полярність на електродах періодично змінюється.

Результати досліджень та їх обговорення. Відповідно до постановки завдання прийняті такі вихідні положення:

1. Введення частинки аерозолю в канал здійснюється дисковим обертальним розпилювачем з вертикальною віссю обертання.

2. Аеродинамічний режим у каналі усталений, швидкість повітряного потоку розподілена за радіусом каналу, в першому наближені приймається рівномірною;

3. Обертання частинки відсутнє. Частинки не взаємодіють.

Схема розміщення електродів для створення електростатичного поля і руху повітря та частинок показана на рис. 1.

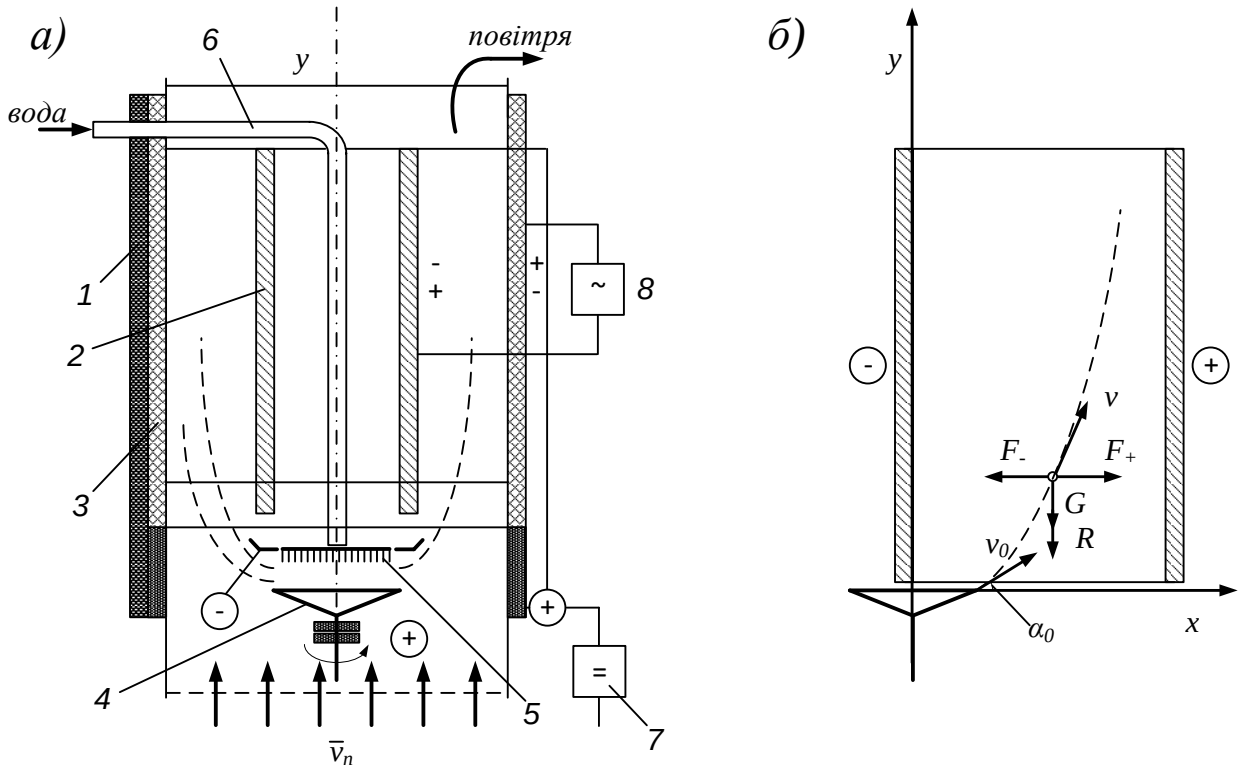

Рис. 1. Функціонально-розрахункова схема (*а*) та схема діючих сил (*б*):
1 – корпус (електроізольований) пневмоканалу; 2, 3 – циліндричні електроди; 4 – обертальний диск; 5 – коронуючи електроди; 6 – трубопровід дозованої подачі рідини; 7, 8 – джерела високої напруги

Відповідно до схеми силової взаємодії краплини з повітряним потоком та електричними полями на краплинку діють сили: тяжіння $G = mg$; опору повітряному середовищу (за законом Стокса) $R = 3\pi\mu d\bar{v}k$ (де $k = \left(1 + \mathrm{Re}^{-1}\right)$; Re – критерій Рейнольдса; d – діаметр краплини; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря; $\bar{v} = \bar{v}_n - \bar{v}_k$ – відносна швидкість; $\bar{v}_n$ – швидкість повітря); електрична $F = qE$ (де q – електричний заряд краплини ($q = q(d)$; E – напруженість електричного поля); інерції $F_i = m\dfrac{dv_k}{d\tau}$ (де m – маса краплини; v_k – швидкість переміщення).

Рух частинки в каналі при дії означених сил описується векторним рівнянням:

$$m\frac{d\bar{v}_k}{d\tau} = \bar{G} + \bar{R} + \bar{F}\ . \qquad (1)$$

Проектуючи рівняння (1) на осі координат $0x$ і $0y$ (рис. 1) отримаємо систему координатних рівнянь:

$$m\frac{d^2x}{d\tau^2} = -R\cos\alpha \pm F, \tag{2}$$

$$m\frac{d^2y}{d\tau^2} = -R\sin\alpha - G, \tag{3}$$

де $\cos\alpha = \dfrac{\dfrac{dx}{d\tau}}{v}$; $\sin\alpha = \dfrac{v_n - \dfrac{dy}{d\tau}}{v}$; $v = \sqrt{\left(v_n - \dfrac{dy}{d\tau}\right)^2 + \left(\dfrac{dx}{d\tau}\right)^2}$.

Величина заряду отриманого частинкою, що проводить, в електричному полі визначається відомою формулою:

$$q = 2\pi\varepsilon_0 r^2 E, \tag{4}$$

де r – радіус частинки; ε_0 – відносна проникність вакууму.

Масу частинки можна виразити через розмір d і густини ρ:

$$m = \frac{\pi d^3}{6}\rho. \tag{5}$$

Зміну полярності електростатичного поля в часі можна представити рядом Фур'є у вигляді:

$$E(\tau) = \frac{4E}{\pi}\left(\sin\omega\tau + \frac{\sin 3\omega\tau}{3} + \frac{\sin 5\omega\tau}{5} + \ldots\right), \tag{6}$$

де $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$; T – період часу.

Підставляючи в рівняння (2) і (3) значення діючих сил і швидкостей з урахуванням (4) – (6) після перетворень отримаємо:

$$\frac{d^2x(\tau)}{d\tau^2} = -k_1\frac{dx(\tau)}{d\tau} + k_2\left(E\sin\omega\tau\right)^2, \tag{7}$$

$$\frac{d^2y(\tau)}{d\tau^2} = -k_1\left(v_n - \frac{dy(\tau)}{d\tau}\right) - g, \tag{8}$$

де $k_1 = \dfrac{6\mu r}{d^3\rho}$; $k_2 = \dfrac{72\varepsilon_0 r^2}{d^3\rho}$,

в рівнянні (7), враховано тільки перший член ряду (для спрощення розв'язку і як пере наближення).

Початкові умови для розв'язку рівнянь (7) – (8):

$$\tau = 0;\ x = 0;\ y = 0;\ \frac{dx(\tau)}{d\tau} = v_0 \cos\alpha_0;\ \frac{dy(\tau)}{d\tau} = v_0 \sin\alpha_0, \qquad (9)$$

де α_0 – кут вводу частинки в канал.

Система рівнянь (7) – (8) не зв'язана, і рівняння (7) і (8) можуть бути проінтегровані. При початкових умовах (9) розв'язок рівнянь можна представити у вигляді:

$$x(\tau) = \frac{1}{4k_1^2} e^{-k_1\tau} \left(\begin{array}{l} 4\left(e^{k_1\tau} - 1\right)k_1 v_0 \cos\alpha + \dfrac{1}{\omega\left(k_1^2 + 4\omega^2\right)} E^2 k_2 \times \\ \times \left(8\omega^3 + e^{k_1\tau} \left(\begin{array}{l} 2\omega\left(k_1\tau - 1\right)\left(k_1^2 + 4\omega^2\right) + \\ + 2k_1^2 \omega \cos(2\tau\omega) - k_1^3 \sin(2\tau\omega) \end{array} \right) \right) \end{array} \right), \qquad (10)$$

$$y(\tau) = k_1^{-2}\left((g + k_1 v_n)\left(1 - e^{k_1\tau} + k_1\tau\right) + \left(e^{k_1\tau} - 1\right)k_1 v_0 \sin\alpha\right). \qquad (11)$$

З рівняння (10) і (11) можна визначити час перебування частинки в пневмоканалі та траєкторії руху частинки: $x(y) = S$ (де S – шлях переміщення).

На рис. 2 наведені траєкторії руху частинок аерозолю під дією повітряного потоку та змінного електричного поля.

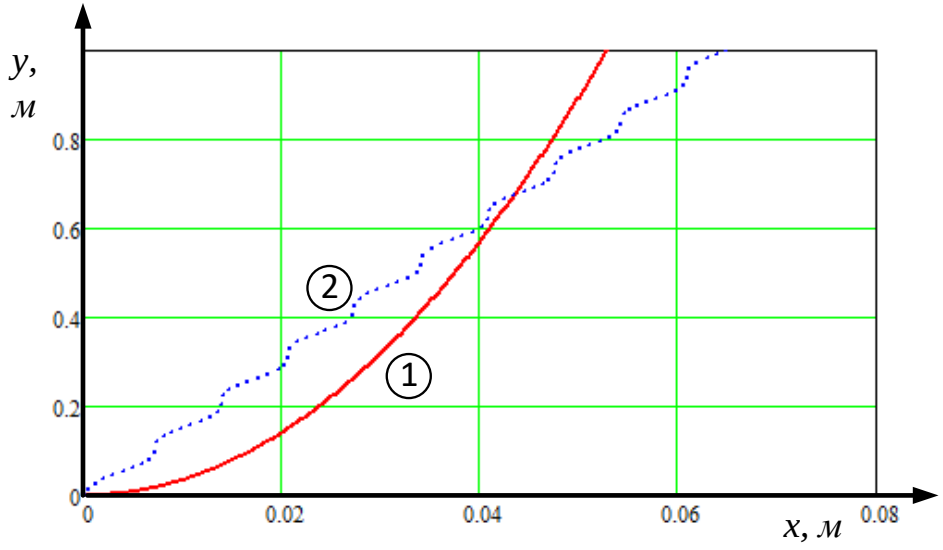

Рис. 2. Траєкторії руху частинок аерозолю під дією повітряного потоку (1) та змінного електричного поля (2)

Висновки і перспективи.

1. Отримано рівняння, що дозволяють визначити час перебування частинки аерозолю в пневмоканалі та визначити траєкторії її руху.

2. На основі чисельного розв'язку рівнянь (10) та (11) визначено траєкторії руху частинок аерозолю під дією повітряного потоку та змінного електричного поля. Використання змінного електричного поля збільшує траєкторію руху та час перебування частинки аерозолю в каналі.

Список використаних джерел

1. Шебанін В. С., Бацуровська І. В., Гавриш В. І., Грубань В. А. Електротехнології в АПК : навч. посіб. Ред. Шебаніна В. С. Миколаїв: МНАУ, 2022. 326 с.

2. Іноземцев Г. Б., Берека О. М., Окушко О. В., Усенко С. М. Електротехнології обробки сільськогосподарської продукції. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2015. 306 с.

3. Бершова И. В., Гладкова Н. Ю. Улучшение качества распыливания жидкости за счет наложения электрического поля. Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт». 2006. Вип. 26. С. 26–31.

4. Іноземцев Г. Б. Науково-технічні передумови застосування електричного поля при захисті рослин. Енергетика і автоматика. 2006. Вип. 3, № 7. С. 12–18.

5. Салимов А. У., Балабеков М. Т., Багдасаров А. М. Вопросы теории электростатического распыливания и интенсификации процессов сгорания жидких топлив. Ташкент: ФАН, 1968. 110 с.

6. Іноземцев Г. Б. Розпилювання живильних розчинів та захисних препаратів в електричному полі. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2004. № 1. С. 25–29.

7. Котов Б. І., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д., Грищенко В. О. Динаміка розпилювання і випаровування води в електричному полі при зволожувані повітря. Енергетика і автоматика. 2018. № 2. С. 145–158.

8. Іноземцев Г. Б., Ващишин С. Д. Дослідження електрофізичних параметрів живильних розчинів на здатність їх до електростатичного розпилення. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2012. № 1. С. 25–39.

9. Ващишин С. Д., Іноземцев Г. Б. Підвищення ефективності керування вхідними параметрами процесу нанесення розчинів на овочеві культури. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 261. С. 64–69.

References

1. Shebanin, V. S., Batsurovska, I. V., Havrysh, V. I., Hruban, V. A. (2022). Elektrotekhnolohii v APK : navch. posib [Electrotechnologies in the agro-industrial complex: a textbook]. Red. Shebanina V. S. Mykolaiv: MNAU, 326.

2. Inozemtsev, H. B., Bereka, O. M., Okushko, O. V., Usenko, S. M. (2015). Elektrotekhnolohii obrobky silskohospodarskoi produktsii [Electrotechnologies of agricultural products processing]. Kyiv: TsP «KOMPRYNT», 306.

3. Bershova, Y. V., Hladkova, N. Yu. (2006) Uluchshenye kachestva raspылyvanyia zhydkosty za schet nalozhenyia эlektrycheskoho polia [Improvement of quality of liquid atomization due to the imposition of electric field]. Bulletin of NTU "Kharkov Polytechnic Institute", 26, 26–31.

4. Inozemtsev, H. B. (2006). Naukovo-tekhnichni peredumovy zastosuvannia elektrychnoho polia pry zakhysti roslyn [Scientific and technical prerequisites for the use of electric field in plant protection]. Energy and automation, 3(7), 12–18.

5. Salimov, A. U., Balabekov, M. T., Bagdasarov, A. M. (1968). Voprosy teorii elektrostaticheskogo raspylivaniya i intensifikatsii protsessov sgoraniya zhidkikh topliv [Questions of the theory of electrostatic atomization and intensification of combustion processes of liquid fuels]. Tashkent: FAN, 110.

6. Inozemtsev, H. B. (2004). Rozpyliuvannia zhyvylnykh rozchyniv ta zakhysnykh preparativ v elektrychnomu poli [Spraying of nutrient solutions and protective preparations in an electric field]. Electrification and automation of agriculture, 1, 25–29.

7. Kotov, B. I., Pantsyr, Yu. I., Herasymchuk, I. D., Hryshchenko, V. O. (2018). Dynamika rozpyliuvannia i vyparovuvannia vody v elektrychnomu poli pry zvolozhuvani povitria [Dynamics of water spraying and evaporation in an electric field when humidifying air]. Energy and Automation, 2, 145–158.

8. Inozemtsev, H. B., Vashchyshyn, S. D. (2012). Doslidzhennia elektrofizychnykh parametriv zhyvylnykh rozchyniv na zdatnist yikh do elektrostatychnoho rozpylennia [Investigation of electrophysical parameters of nutrient solutions for their ability to electrostatic spraying]. Electrification and automation of agriculture, 1, 25–39.

9. Vashchyshyn, S. D., Inozemtsev, H. B. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti keruvannia vkhidnymy parametramy protsesu nanesennia rozchyniv na ovochevi kultury [Increasing the efficiency of controlling the input parameters of the process of applying solutions to vegetable crops]. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Technique and energy of the agro-industrial complex, 261, 64–69.

ANALYSIS OF THE MOVEMENT OF AEROSOL PARTICLES IN THE CHANNEL OF AN ELECTROPNEUMATIC DISK SPRAYER

V. Hryshchenko, B. Kotov

Abstract. *In modern agriculture, there is a need to improve technologies for plant protection, air disinfection, animal and poultry vaccination, as well as humidification and ionization of indoor air. The electro-aerosol treatment method proves to be effective, but for its widespread use, it is necessary to develop various installations for generating charged aerosols. One of the main difficulties is the creation of sources of charged particles of different concentrations that would ensure the controllability of the spraying and charging process. The combination of electrostatic spraying with other methods, such as pneumatic and mechanical spraying, shows significant opportunities to improve the efficiency of the process. Experimental results confirm the effectiveness of electrostatic*

spraying, but for widespread implementation, it is necessary to study combined methods and develop appropriate technologies and technical means of process control.

The works on the analysis of research and publications show the prospects for the use of electroaerosol technologies in agriculture, and also indicate the need for further development and improvement of these methods. Evaluation of the possibilities and feasibility of using a combined method of generating and stabilizing aerosols by mathematical modeling of aerosol particle trajectories. Use of mathematical modeling to determine the movement of aerosol particles in electric fields. The development of electroaerosol treatment technology is a relevant and promising area for agricultural production, but further research and development of combined methods and technologies is necessary for its effective use.

Key words: ***aerosol, electric field, pneumatic channel, centrifugal atomizer, particle motion***