

УДК 631.371:621.365(075.8)

ДИНАМІКА РОЗПИЛЮВАННЯ І ВИПАРОВУВАННЯ ВОДИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ ПРИ ЗВОЛОЖУВАНІ ПОВІТРЯ

Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор

Ю. І. Панцир, кандидат технічних наук, доцент

І. Д. Герасимчук, кандидат технічних наук, доцент

Подільський державний аграрно-технічний університет,

В. О. Грищенко, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України,

E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. *В статті розглянуто теоретичні передумови процесів розпилювання крапель води і їх випаровування в об'ємі повітряно-крапельного факелу в процесі руху в електростатичному полі для зволоження повітря в робочому об'ємі споживача. Наведено математичну модель процесів тепло- і масообміну при випаровуванні крапельного потоку і зволоженні повітря у вигляді системи диференціальних рівнянь. Отримані аналітичні залежності які описують зміну параметрів повітря, крапельного потоку і самих крапель в часі. Проілюстровано графічно, зміну розміру крапель, вологовмісту і відносну вологість повітря в часі при дії електростатичного поля. Визначено суттєве збільшення швидкості випаровування крапель при їх розпилюванні в електростатичному полі.*

Ключові слова: *розпилення води, краплі, електричне поле, зволоження повітря*

Актуальність. Одним із важливих показників технологічного мікроклімату, що забезпечує життєдіяльність рослин і тварин є вологість повітря в робочому об'ємі виробничої споруди. Величину нормативної вологості повітря, стабілізують шляхом подачі водяної пари в повітряний потік, що досягається різними способами, зокрема розпилюванням води [1–3]. Ефективність цього способу зволоження повітря в першу чергу залежить від дисперсності розпилу і швидкості випаровування крапель (щоб уникнути їх осідання). Одним із шляхів покращення якості розпилу є використання

електростатичного поля. При накладені електричного поля на рідину, що розпилюється, отриманий двофазний потік становиться в більшому ступеню монодисперсним і дрібнодисперсним. Ефективність зволоження повітря залежить від цілого ряду параметрів, вплив яких на кінцеву вологість необхідно виявити і кількісно оцінити.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині встановлено, що під дією електричного поля, зростає ефективність, як самого процесу розпилу [4–10], так і подальшого випаровування розпилених крапель у повітрі [6, 11]. В роботі [12] показано ефективність застосування електричного поля для інтенсифікації випаровування води з відкритої поверхні. В роботах [7–9] визначено покращення якості розпилювання рідини за рахунок накладання електричного поля. В роботі [13] подано динаміку зволоження повітря розпиленою водою. Комплексні дослідження динаміки випаровування розпиленої рідини за наявності електричного поля в літературі відсутні.

Мета дослідження – встановлення впливу електричного поля, параметрів двофазного (повітряно-водяної суміші) на процес зволоження повітря і можливість керування ним.

Матеріали і методи дослідження. Основним методом досліджень є теоретичний аналіз штучної електризації рідини і її вплив на процес розпилювання; процеси випаровування води і зволоження повітря досліджувались на основі аналізу теплового і матеріального балансу.

При електризації рідини в процесі розпилу (диспергування) шляхом підведення потенціалу до штуцера форсунки, електростатичною індукцією, коронним розрядом та іншими способами струмів рідини знаходиться в електричному полі. Під впливом цього поля на поверхні плівки рідини відбувається розподіл тисків, які визивають втрату стійкості, розпад і утворення крапель.

При цьому збільшується електричний потенціал крапель, зменшується власний внутрішній тиск і, відповідно поверхневий натяг. Заряджені краплі набувають нові фізичні властивості, як підвищення дисперсності розпилювання і інтенсифікації перетворення рідкої фази в парову.

Для якісного аналізу і кількісного оцінювання фізичних процесів внутрішній тиск і поверхневий натяг незарядженої краплі замінюють на ці параметри для краплі, яка отримала певний електричний заряд Q або потенціал U .

При відомому електричному заряді тиск пари над краплею визначається у відповідності до закону Лапласа [4] (гіпсометрична формула [4, 6]) з модифікованого запису (при урахуванні втрати маси краплини в середовищі) із рівняння [4]:

$$\ln \frac{P_{nq}}{P_n} = \frac{N}{RT} \frac{4\pi r^3}{3} \left(\frac{2\sigma}{r} - \frac{Q^2}{32\varepsilon\varepsilon_0\pi^2 r^4} \right), \quad (1)$$

де $\varepsilon = 1 + 2 \frac{\varepsilon_p + 1}{\varepsilon_p + 2}$; N – число Авогадро, ($N = \frac{M}{m}$, m – маса одної краплі, M – маса одного моля); P_{nq} – тиск (парціальний) над зарядженою краплею, Па; P_n – тиск у оточуючому середовищі, Па; R – універсальна газова стала, Дж/(кг·К); T – температура оточуючого середовища, К; r – радіус краплі, м; σ – поверхневий натяг, Н/м; Q – заряд частинки, Кл; ε_p – діелектрична стала; ε_0 – стала електричного поля (для повітря $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Кл/(В·м)).

Надлишковий тиск в середині зарядженої краплі при відомому потенціалі краплі U визначається рівнянням [6]:

$$P_q = \frac{2\sigma}{r} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2r^2}. \quad (2)$$

Поверхневий натяг зарядженої краплини при відомих значеннях U і Q розраховують за рівняннями [4]:

$$\sigma_q = \sigma - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{4r} = \sigma - \frac{Q^2}{\varepsilon\varepsilon_0 64\pi^2 r^3}. \quad (3)$$

Радіус розпилюваних крапель, які утворюються під дією електростатичного заряду або електричного потенціалу визначають [4, 6] із відповідних рівнянь:

$$r_\partial = r - \varepsilon\varepsilon_0 \frac{U^2}{4\sigma} = r - \frac{Q^2}{\varepsilon\varepsilon_0 \pi^2 64r^2 \sigma}. \quad (4)$$

Швидкість випаровування краплі яка отримала електричний заряд визначається з рівняння Дальтона заміною P_n на $P_{n\partial}$, $\beta = \beta_\partial$; $S_k = S_\partial = 4\pi r_q^2$:

$$W = -\frac{dm}{d\tau} = \beta_\partial S_k (P_{nn} - P_{n\partial}), \quad (5)$$

де $P_{nn} = a\theta + c$ – парціальний тиск насиченої пари на поверхні краплі при температурі її поверхні θ , Па; β – коефіцієнт масообміну віднесений до парціального тиску, кг/(Па·с); S_k – поверхня краплі, м²; W – швидкість випарування, кг/с; a, c – коефіцієнти лінійної апроксимації залежності $P_{nn} = f(\theta)$.

Коефіцієнт масообміну з рівняння (5):

$$\beta = \frac{W}{\Delta P_\partial 4\pi r_\partial^2} = Nu_m \frac{D_\partial}{2r}, \quad (6)$$

де $\Delta P_\partial = P_{nn} - P_{n\partial}$, Па; D_∂ – коефіцієнт дифузії парів води в повітря, м²/с.

Враховуючи, що (при відсутності руху краплі відносно повітря) для молекулярної дифузії і теплопередачі критерій Нусельта: $Nu = 2$, з рівняння (6) матимемо:

$$\beta = \frac{\Delta m}{\Delta P_\partial 4\pi r \tau}, \quad (7)$$

де Δm – зміна маси краплі за час τ , кг.

При наявності відносного руху зарядженої краплі в повітрі коефіцієнт масообміну визначається з критеріального рівняння у вигляді [11]:

$$Nu_m = \beta \frac{2r}{D} = 2 + B_m \operatorname{Re}^{1.3} \operatorname{Pr}_m^{0.33}, \quad (8)$$

де $\operatorname{Pr}_m = \frac{\nu}{D}$ – число Прандля; ν – в'язкість рідини, $\text{м}^2/\text{с}$; B_m – коефіцієнт, що враховує вплив електричного поля на кінетику випарування краплі ($B_m = B_m(E)$).

Величина заряду краплі при контактному зарядженні визначається з рівняння [5]:

$$Q = R^2 \frac{4}{r_k \ln \frac{2H}{r}} \left(1 - \varepsilon_0 \varepsilon_p \frac{\rho_0}{H^2} (U - U_k) \right), \quad (9)$$

де R, r_k – радіус краплі і кромки електрода, м; H – відстань між електродами, м; ρ_0 – питомий опір розпилюємої рідини, Ом·м.

Враховуючи, що крапля на кромці розпилювача під дією сил електричного поля і інерційності приймає форму половини еліпсоїда обертання (перед відривом), оцінити час заряджання краплі можна за формулою [8]:

$$\tau = \varepsilon_0 \rho_0 \frac{\varepsilon \chi + (1 - \chi)}{\chi}, \quad (10)$$

де $\chi = \frac{1 - e^2}{2e^2} \left(\ln \frac{1 + e}{1 - e} - 2e \right)$ – коефіцієнт деполяризації еліпсоїда; $e = \sqrt{1 - \frac{b_e}{a_e}}$ – ексцентриситет еліпсоїда; a_e, b_e – більша і мала піввісь еліпсоїда.

Величина заряду краплин при розпилюванні відцентрово-щільовою форсункою за даними експериментів [7] апроксимовані залежністю:

$$q10^{-4} = 1 + 2.8U, \quad (11)$$

де q – питомий масовий заряд, Кул/кг; U – напруга на електродах, кВ.

Розмір диспергованих крапель в залежності від прикладеної напруги, за даними експериментів апроксимована залежністю:

$$d_{k0} = 200 - 50U, \quad (12)$$

де d_{k0} – діаметр краплини, мкм; U – напруга на електродах, кВ.

Результати досліджень та їх обговорення. Відповідно до існуючих уявлень про динаміку двофазних потоків факелу рідинно повітряної суміші, утвореного механічними форсунками представимо фізичну картину досліджуємого процесу таким чином. В потік розпиленої води поступає (всмоктується в корінь факелу в наслідок розрідженого тиску) повітря і приєднується в процесі руху до поверхні крапель [13]. Краплини під час руху випаровуються і рухаються в повітрі насиченому водяною паром, збільшуючи вологовміст повітряного струменю за координатою. Збільшення вологовмісту повітря знижує інтенсивність випарування.

Для складання математичного опису приймемо наступні припущення:

– краплини «вилітають» з точкового джерела на осі факелу розпилу у формі кулі, маючи однаковий розмір і не взаємодіють між собою (уніполярно заряджені частинки-краплинки рівномірно розсіюються під дією свого об'ємного заряду, збільшуючи об'єм факелу розпилу [4]);

– рушійною силою процесу випарування є різниця парціального тиску водяної пари на поверхні краплі і в повітрі, з урахуванням рівнянь (1) і (5);

– величина парціального тиску водяної пари на поверхні краплі дорівнює тиску насиченої пари при температурі поверхні каплі, і апроксимується лінійною залежністю $P_n''(\theta) = a\theta + c$ (де a, c – сталі коефіцієнти), величина тиску пари у повітрі є функцією вологовмісту повітря $P_n(d) = bd$ (d – вологовміст повітря, кг/кг_{сп}; b – стала величина);

– маса крапель, їх поверхня і маса повітря в об'ємі факелу незмінні.

При зроблених припущеннях і фізичною природою тепломасообмінних процесів у факелі, двофазну систему рухомого потоку, можна представити моделлю проточного апарату ідеального змішування і визначити зміну в часі параметрів повітря і води на «виході» факелу, тобто коли повітря насичене

вологою подається в робочий об'єм споживача вологого повітря (камера, приміщення, об'єкт зволоження, тощо).

Рівняння теплового і матеріального балансу рідинно-повітряного потоку запишемо у такому вигляді:

$$m_1 \frac{d\theta}{d\tau} = G_v c_p (t_1 - t) + G_w c_w (\theta_1 - \theta) + G_v r_0 (d - d_1), \quad (13)$$

$$m_2 \frac{dd}{d\tau} = G_v (d_1 - d) + \beta F_k (a\theta + c - b\bar{d}e^{B'}), \quad (14)$$

$$-\frac{dm}{d\tau} = m_2 \frac{dd}{d\tau}, \quad (15)$$

$$-\frac{\pi}{2} \rho_w d_k^2 \frac{dd_k}{d\tau} = \rho_v V_\phi \frac{dd}{d\tau}, \quad (16)$$

$$\varphi(\tau) = \frac{P_\sigma}{622 P''(\theta)} \frac{d'}{d}, \quad (17)$$

де $m_1 = m_v c_p + m_w c_w$; $m_2 = m_v = V_\phi \rho_v$; $\bar{d} = 0.5(d_1 + d_2)$;

$$B' = \frac{N}{RT} \frac{\pi 4r^3}{3} \left(\frac{2\sigma}{r} - \frac{Q^2}{32\epsilon\epsilon_0\pi^2 r^4} \right).$$

В рівняннях (13–17) позначено: θ, t – температура води і повітря, °С; d – вологовміст повітря, кг/кг_{сп}; G_v, G_w – витрати повітря і води, кг/с; c_p, c_w, r_0 – питомі теплоємності повітря, води і теплота пароутворення, відповідно, Дж/(кг·°С), Дж/кг; S – поверхня крапель у факелі, м²; β – коефіцієнт масообміну, м/с; m_1 – теплоємність пароводяної суміші; m_2 – маса повітря у факелі; m_w – маса краплини; V_ϕ – повітряний об'єм факелу; ρ_w, ρ_v – густина води і повітря, кг/м³; d_k – діаметр краплини, м.

Приймаючи, що при (повному) випаровуванні краплини на виході факелу розпилу температура води дорівнює температурі повітря (насиченого) $t_2 = \theta_2 = \theta$, а вологовміст d , перепишемо рівняння (13) і (14) у вигляді:

$$\frac{m_1}{G_v r_0} \frac{d\theta}{d\tau} = \left(\frac{c_p}{r_0} t_1 + \frac{G_w}{G_v} \frac{c_w}{r_0} \theta_1 + d_1 \right) - \left(\frac{c_p}{r_0} + \frac{G_w}{G_v} \frac{c_w}{r_0} \right) \theta - d, \quad (18)$$

$$\frac{m_2}{0.5\beta S a} \frac{dd}{d\tau} = \frac{(G_v - 0.5\rho_v \beta S) d_1 + 0.5\beta S a \rho_v \theta_1 + \beta S \rho_v c}{0.5\beta S a \rho_v} - \frac{0.5\beta S}{0.5\beta S a} d + \theta, \quad (19)$$

Введемо такі позначення: $\mu_p = G_w/G_v$ – коефіцієнт зрошення; $T_1 = \frac{m_1}{G_v r_0}$;

$$T_2 = \frac{m_2}{0.5\beta S a \rho_v}; \quad a_1 = \frac{c_p}{r_0} + \mu_p \frac{c_w}{r_0}; \quad a_2 = \frac{1}{a}; \quad b_1 = \frac{c_p}{r_0} t_1 + \mu_p \frac{G_w}{r_0} \theta_1 + d_1;$$

$$b_2 = \frac{(G_v - \beta S \rho_v) d_1 + 0.5\beta S a \rho_v \theta_1 + \beta S \rho_v c}{0.5\beta S a \rho_v};$$

і після перетворень матимемо замість (18) і (19) рівняння:

$$\begin{cases} T_1 \frac{d\theta}{d\tau} + a_1 \theta_1 - b_1 = -d; \\ T_2 \frac{dd}{d\tau} + a_2 d - b_2 = \theta. \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} T_1 \frac{d\theta}{d\tau} + a_1 \theta_1 - b_1 = -d; \\ T_2 \frac{dd}{d\tau} + a_2 d - b_2 = \theta. \end{cases} \quad (21)$$

Об'єднуючи їх в одне рівняння отримаємо:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 d}{d\tau^2} + (T_1 a_2 + T_2 a_1) \frac{dd}{d\tau} + (a_1 a_2 + 1) d = b_1 + a_1 b_2, \quad (22)$$

або

$$A \frac{d^2 d}{d\tau^2} + B \frac{dd}{d\tau} + C d = D_1, \quad (22a)$$

де $A = T_1 T_2$; $B = T_1 a_2 + T_2 a_1$; $C = a_1 a_2 + 1$; $D_1 = b_1 + a_1 b_2$.

Розв'язуючи рівняння (22a) при початкових умовах: $\tau = 0; d = d_0 = d_1$ де ($d_0 = d_1$ – вологовміст повітря зовнішнього, яке подається у факел) отримаємо для прямооточного руху крапель і повітря

$$d(\tau) = \frac{d_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}, \quad (23)$$

де $r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ – корені характеристичного рівняння.

Аналогічно отримаємо рівняння для зміни температури води (краплин) в часі:

$$A \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + B \frac{d\theta}{d\tau} + C d\theta = D_2 = a_2 b_1 - b_2, \quad (24)$$

і його розв'язок за початкових умов: $\tau = 0; \theta = \theta_0 = \theta_1$:

$$\theta(\tau) = \frac{\theta_0 C - D_2}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C}. \quad (25)$$

Продиференціюємо рівняння (23):

$$\frac{dd(\tau)}{d\tau} = k_1 r_1 r_2 (e^{r_2 \tau} - e^{r_1 \tau}), \quad (26)$$

де $k_1 = \frac{d_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)}$; $k_2 = k_1 r_1 r_2$;

і підставимо отримане значення в рівняння (16):

$$-d^2 \frac{dd}{d\tau} = \frac{\rho_v V_\phi^3}{\pi \rho_w} k_2 (e^{r_2 \tau} - e^{r_1 \tau}), \quad (27)$$

або $-d^2 dd = k_0 (e^{r_2 \tau} d\tau - e^{r_1 \tau} d\tau)$, $k_0 = k_2 \frac{\rho_v V_\phi^3}{\pi \rho_w}$; $-\frac{1}{3} d^3 = \frac{k_0}{r_2} e^{r_2 \tau} - \frac{k_0}{r_1} e^{r_1 \tau} + C$.

При $\tau = 0; d = d_0; C = -\frac{1}{3} d_0^3 - \frac{k_0}{r_2} + \frac{k_0}{r_1}$;

$$-\frac{1}{3} d^3 = \frac{k_0}{r_2} e^{r_2 \tau} - \frac{k_0}{r_1} e^{r_1 \tau} - \frac{1}{3} d_0^3 - \frac{k_0}{r_2} + \frac{k_0}{r_1};$$

$$d^3(\tau) = d_0^3 - \frac{k_0}{r_1} (1 - e^{r_1 \tau}) + \frac{k_0}{r_2} (1 - e^{r_2 \tau});$$

або

$$d(\tau) = \left(d_0^3 - \frac{k_0}{r_1} (1 - e^{r_1 \tau}) + \frac{k_0}{r_2} (1 - e^{r_2 \tau}) \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (28)$$

Апроксимуючи експериментальні дані [13] швидкості осідання краплин в факелі повітря-рідинної суміші різного поверхневого діаметру отримали залежність:

$$V_{\kappa} = a_1 d^2, \quad (29)$$

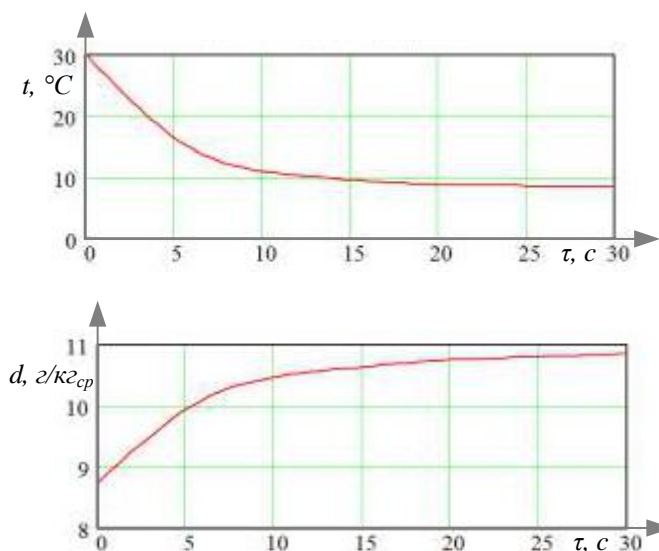
де $a = 4.3 \cdot 10^{-5}$, $1/(m \cdot s)$ – сталий коефіцієнт.

Враховуючи, що $V = dH/d\tau$ (де H – шлях переміщення краплини) з рівняння (29) матимемо:

$$\int_0^S dS = a_1 \int_0^{\tau} \left(d_0^3 - k_3(1 - e^{r_1\tau}) + k_4(1 - e^{r_2\tau}) \right)^{\frac{1}{3}} d\tau, \quad (30)$$

де $k_3 = \frac{k_0}{r_1}$; $k_4 = \frac{k_0}{r_2}$.

Таким чином отримані рівняння (23), (25), (28) дозволяють визначити зміну основних параметрів розпиленої води і повітря в часі. На рисунку 1 наведено графічні залежності зміни параметрів розпиленої води і повітря в часі, а на рисунку 2 зміну розміру краплини в часі. З рисунку 2 визначається час повного випаровування краплини з початковим радіусом d_{k0} .



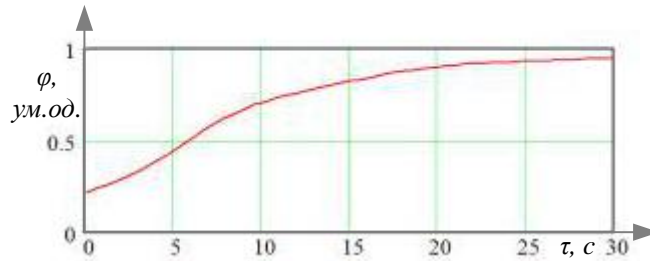


Рис. 1. Динаміка зміни параметрів повітря на виході факелу розпилю

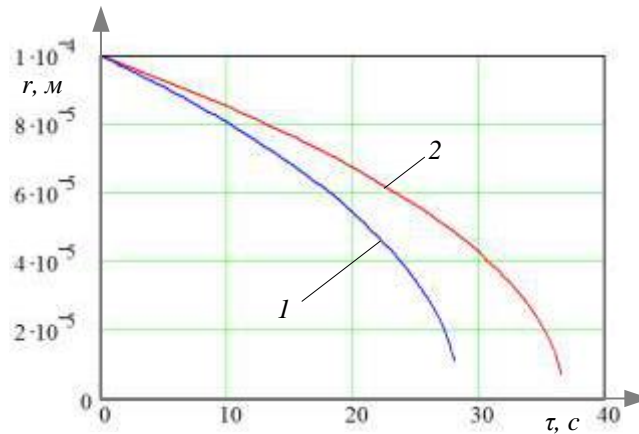


Рис. 2. Зміна розміру краплини в часі:

1 – заряджена крапля; 2 – незаряджена крапля

Висновки і перспективи.

1. Розроблено математичну модель процесу зволоження повітря розпиленою водою в електричному полі, яка дозволяє визначити зміну параметрів повітря в процесі його зволоження.

2. Отримані аналітичні залежності для визначення основних параметрів динаміки зволоження повітря і випаровування крапель розпилених в електричному полі.

3. Виконані розрахунки підтверджують можливість збільшення інтенсивності випаровування крапель в електричному полі на 26...30 %.

Список літератури

1. Изельт П. Увлажнение воздуха. Системы и применение / П. Изельт, У. Арндт, М. Вильке; пер. с нем. Л. Н. Казанцевой ; под ред. Г. В. Резникова. – М.: Техносфера: Евроклимат, 2007. – 212 с.
2. Куличенко В. К вопросу увлажнения воздуха распыленной водой / В. Куличенко, А. Волик // Труды Николаевского кораблестроительного института. – 1978. – Вып. 137. – С.73–76.
3. Василюв П. А. Система увлажнения воздуха в овощехранилищах вертикально-дисковым распылителем воды и растворов.: Автореф. дис. .. канд. техн. наук. – М., 1987. – 17 с.
4. Салимов А. У. Вопросы теории электростатического распыливания и интенсификации процессов сгорания жидких топлив / А. У. Салимов, М. Т. Балабеков, А. М. Багдасаров; М-во высш. и сред. спец. образования УзССР. Ташк. политехн. ин-т. – Ташкент: Фан, 1968. – 110 с.
5. Лившиц, М. Н. Электрические явления в аэрозолях и их применение / М. Н. Лившиц, В. М. Моисеев. – М.: Энергия, 1965. – 224 с.
6. Пажи Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
7. Бершова И. В. Улучшение качества распыливания жидкости за счет наложения электрического поля / И. В. Бершова, Н. Ю. Гладкова // Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт». – 2006. – № 26. – С.26–31.
8. Бураев Т. К. Физические процессы при распыливании жидкостей в электрическом поле / Т. К. Бураев, И. П. Верещагин // Известия АН СССР (Энергетика и транспорт). – 1971. – № 5. – С.70–79.
9. Чернобыльский И. И. Исследование работы пневматической форсунки высокого давления с электризацией капель // И. И. Чернобыльский, И. Г. Плит, М. И. Павлицев и др. // Химическое машиностроение. – 1968. – № 6. – С.87–90.
10. Іноземцев Г. Б. Розпилювання живильних розчинів та захисних препаратів в електричному полі / Г. Б. Іноземцев // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 1. – С.25–29.
11. Кокин А. С. Влияние электростатического поля на процессы испарения в дисперсных средах / А. С. Кокин, В. Г. Попов // Теоретические основы химической технологии. – 1977. – Т. XI. – № 4. – С.626–629.
12. Котов Б. І. Математичні моделі динаміки електричних зволожувачів повітря / Б. І. Котов, В. О. Грищенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2013. – Вип. 43. – Ч. 1. – С.71–76.
13. Котов Б. І. Математична модель динаміки зволоження повітря розпиленою водою / Б. І. Котов, А. В. Спирін, В. В. Деркач // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві». – 2016. – С.211–218.

References

1. Izel't, P., Arndt, U., Vil'ke M. (2007) Uvlazhnenie vozdukha. Sistemy i primeneniye [Moistening of the air. Systems and applications]. Moscow: Tekhnosfera: Evroklimat, 212.
2. Kulichenko, V., Volik, A. (1978) K voprosu uvlazhneniya vozdukha raspylennoy vodoy [On the question of air humidification with sprayed water]. Proceedings of the Nikolaev Shipbuilding Institute, 137, 73–76.
3. Vasiliv, P. A. (1987) Sistema uvlazhneniya vozdukha v ovoshchekhranilishchakh svertikal'no-diskovym raspylitelem vody i rastvorov [A system of air humidification in vegetable stores by a vertically-disk atomizer of water and solutions]. Author's abstract. dis. .. cand. tech. sciences, Moscow, 17.
4. Salimov, A. U., Balabekov, M. T., Bagdasarov, A. M. (1968) Voprosy teorii elektrostatischeeskogo raspylivaniya i intensivatsii protsessov sgoraniya zhidkikh topliv [Questions of the theory of electrostatic atomization and intensification of combustion processes of liquid fuels]. Tashkent: Fan, 110.
5. Livshits, M. N., Moiseev, V. M. (1965) Elektricheskie yavleniya v aerolyakh i ikh primeneniye [Electrical phenomena in aerosols and their application]. Moscow: Energy, 225.
6. Pazhi, D. G., Galustov, V. S. (1984) Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey [Fundamentals of Sputtering of Liquids]. Moscow: Khimiya, 256.
7. Bershova, I. V., Gladkova, N. Yu. (2006) Uluchsheniye kachestva raspylivaniya zhidkosti za schet nalozheniya elektricheskogo polya [Improving the quality of liquid sputtering by applying an electric field]. Bulletin of NTU "Kharkov Polytechnic Institute", 26, 26–31.
8. Buraev, T. K., Vereshchagin, I. P. (1971) Fizicheskie protsessy pri raspylivanii zhidkostey v elektricheskom pole [Physical processes in the spraying of liquids in an electric field]. Izvestiya AN SSSR (Energy and Transport), 5, 70–79.
9. Chernobyl'skiy, I. I. ed (1968) Issledovanie raboty pnevmaticheskoy forsunki vysokogo davleniya s elektrizatsiey kapel' [Investigation of the operation of a high-pressure pneumatic nozzle with electrization of drops]. Chemical Engineering, 6, 87–90.
10. Inozemtsev, H. B. (2004) Rozpyliuvannia zhyvylnykh rozchyniv ta zakhysnykh preparativ v elektrychnomu poli [Boring of nutrient solutions and protective preparations in an electric field]. Electrification and automation of agriculture, 1, 25–29.
11. Kokin, A. S., Popov, V. G. (1977) Vliyanie elektrostatischeeskogo polya na protsessy ispareniya v dispersnykh sredakh [Influence of the electrostatic field on evaporation processes in dispersed media]. Theoretical basis of chemical technology, 4, 626–629.
12. Kotov, B. I., Hryshchenko, V. O. (2013) Matematychni modeli dynamiky elektrychnykh zvolozhuvachiv povitria [Mathematical models of dynamics of electric

air humidifiers]. Collection of scientific works of Kirovograd State University, 43, 71–76.

13. Kotov, B. I., Spirin, A. V., Derkach, V. V. (2016) Matematychna model dynamiky zvolozhennia povitria rozpylenoiu vodoiu [Mathematical model of the dynamics of humidifying air with spray water]. Collection of materials of the International scientific and practical conference "Innovative technologies of balanced use of natural resources in agricultural production", 211–218.

ДИНАМИКА РАСПЫЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ ВОЗДУХА

Б. И. Котов, Ю. И. Панцирь, И. Д. Герасимчук, В. А. Грищенко

Аннотация. В статье рассмотрены теоретические предпосылки процессов распыления капель воды и их испарения в объеме воздушно-капельного факела в процессе движения в электростатическом поле для увлажнения воздуха в рабочем объеме потребителя. Приведена математическая модель процессов тепло- и массообмена при испарении капельного потока и увлажнения воздуха в виде системы дифференциальных уравнений. Получены аналитические зависимости, описывающие изменение параметров воздуха, капельного потока и самих капель во времени. Проиллюстрировано графически, изменение размера капель, влагосодержания и относительной влажности воздуха во времени при воздействии электростатического поля. Определено существенное увеличение скорости испарения капель при их распылении в электростатическом поле.

Ключевые слова: *распыление воды, капли, электрическое поле, увлажнение воздуха*

DYNAMICS OF WATER DISPOSAL AND WATER TREATMENT IN ELECTRIC FIELD WITH COOLED AIR

B. Kotov, Y. Pantsyr, I. Herasymchuk, V. Hryshchenko

Abstract. *In the article the theoretical preconditions of processes of spray of water droplets and their evaporation in the volume of air-drip torch in the course of movement in the electrostatic field for humidifying the air in the user's work volume are considered. The mathematical model of the processes of heat and mass transfer during the evaporation of the droplet flow and the moistened air in the form of a system of differential equations is given. The analytical dependences are obtained that describe the change in air parameters, droplet flow and the droplets themselves over time. Illustrated graphically, change in the size of droplets, moisture content and relative humidity of air in time under the action of an electrostatic field. A significant increase in the rate of evaporation of droplets when sprayed in an electrostatic field is determined.*

Key words: *water spray, drops, electric field, humidifying air*