

Частина 3. Осаджування краплин

Коваль В. П., д.т.н.; Мележик О. І., к.т.н., ТОВ «Агромодуль»

Пестицид може діяти на рослину, лише з осаджених краплин, які містять пестицид. Робоча рідина, яка випаровується з краплин під час осаджування, забруднює атмосферу, а краплини, які не потрапляють на рослини або зісковзують з них – забруднюють ґрунт. Тому осаджування розпиленої робочої рідини є визначальним в обприскуванні.

1. Вимоги до осаджування робочої рідини під час обприскування

Дрібнокраплинне розпилення є необхідною, але недостатньою умовою ефективного обприскування. Робочу рідину необхідно рівномірно розподілити по ширині захвату штанги і осадити з густотою, не меншою за мінімально допустиму: 20 – 30 шт/см² для досходових гербіцидів, 30 – 40 - для післясходових гербіцидів, інсектицидів - 30 і фунгіцидів - 50 – 70 [1].

Згідно з європейськими нормами EN 12761 обприскування вважається рівномірним, якщо для однієї висоти штанги і тиску, визначених виробником, розпилювачі забезпечують розподіл об'єму робочої рідини у поперечному напрямку з коефіцієнтом варіації не більшим за 7 %. Для іншої висоти і тиску, вказаних виробником, коефіцієнтом варіації не повинен перевищувати 9 %.

EN 12761 нормується також знесення розпиленої рідини. Зісковзування краплин з рослин під час обприскування не нормується, незважаючи на те, що об'єм рідини у краплинах більших за 350 мкм, які вважають схильними до зісковзування, досягає у щілинного розпилювача 31 %. Щілинні інжекторні розпилювачі, які створено з метою зменшення знесення краплин, мають в краплинах, що перевищують 350 мкм, більше 50% об'єму розпиленої рідини.

Вилив на гектар рекомендованої кількості робочої рідини не гарантує біологічної ефективності обприскування, оскільки встановлені норми не враховують дисперсність розпилення та спосіб осаджування розпиленої рідини.

2. Математична модель факела

На сьогодні відсутні загальноприйняті методи розрахунку швидкості краплин у факелі.

Відомі експериментальні дослідження Сімакова [2] факела відцентрового розпилювача з сопловим отвором 2 мм, середнім діаметром краплин за Заутером 140 мкм та кутом розпилення 65° при тиску води 0,5 МПа. Було виявлено, що швидкість руху краплин у факелі більша за швидкість повітря. Так до відстані 0,7 м максимальна швидкість краплин зменшувалася з 23,5 до 19 м/с, повітря з ~ 4 до 1,8 м/с. За поясненнями автора така швидкість краплин є наслідок зменшення аеродинамічного опору краплин порівняно з розрахунковим. Але такий рух відомий давно і зумовлений тим, що в умовах

високої щільності, краплини утворюють хмару, яка рухається як єдине ціле в умовах аеродинамічного опору тільки по зовнішній поверхні.

Відцентровий розпилювач РОса[®] з сопловим отвором 1,6 мм, середнім діаметром краплин за Заутером 136 мкм та кутом розпилення 90° при тиску води 0,3 МПа, має швидкість краплин на відстані 0,6 м на рівні 2 м/с і як показує математичне моделювання [3], ніякого зменшення аеродинамічного опору під час руху краплин не виникає, а малі краплини рухаються зі швидкістю повітря.

На рис. 1 показано розрахункову схему факела розпилювача РОса[®], швидкість руху якого відповідає швидкості обприскувача $U_{обпр}$ в умовах дії вітру U_B .

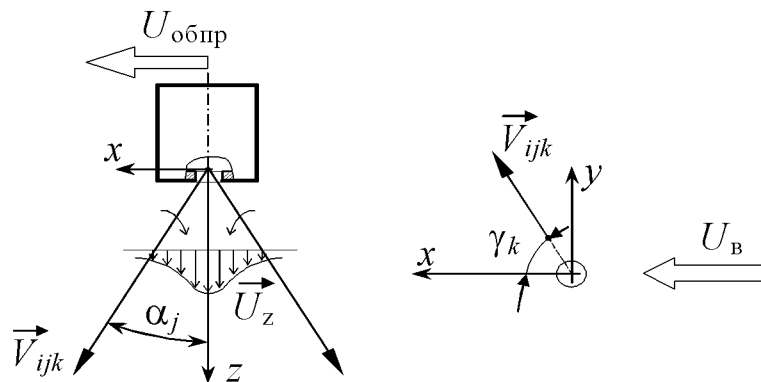


Рис. 1 Схема факелу.

Факел на початковій ділянці всмоктує повітря і формує двофазовий струмінь зі швидкістю повітря \vec{U} (U_x, U_y, U_z). Всмоктування повітря зумовлене зниженням тиску біля вісі закрученого потоку з утворенням у факелі «вихрової воронки».

У системі координат x, y, z рівняння збереження кількості руху, маси і енергії i -тої краплини, з кутом вильоту α_j і γ_k :

$$\frac{dV_{x_{ijk}}}{d\tau} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C_{ijk} \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} \cdot (V_{x_{ijk}} - U_x) \cdot |\vec{V} - \vec{U}|_{ijk}, \quad \frac{dx_{ijk}}{d\tau} = V_{x_{ijk}},$$

$$\frac{dV_{y_{ijk}}}{d\tau} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C_{ijk} \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} \cdot (V_{y_{ijk}} - U_y) \cdot |\vec{V} - \vec{U}|_{ijk}, \quad \frac{dy_{ijk}}{d\tau} = V_{y_{ijk}},$$

$$\frac{dV_{z_{ijk}}}{d\tau} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C_{ijk} \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} \cdot (V_{z_{ijk}} - U_z) \cdot |\vec{V} - \vec{U}|_{ijk} + g, \quad \frac{dz_{ijk}}{d\tau} = V_{z_{ijk}},$$

$$\frac{d}{d\tau} d_{ijk} = -2 \frac{\beta_{ijk}}{\rho} (\rho_n^\theta - \rho_{в.п}), \quad \frac{d}{d\tau} \theta_{ijk} = -\frac{6}{\rho \cdot C_p \cdot d_{ijk}} [\alpha_{ijk} (\theta_{ijk} - T) + \beta_{ijk} (\rho_n^\theta - \rho_{в.п}) L],$$

де коефіцієнт аеродинамічного опору краплини за формулою Клячко Л.С

$$C_{ijk} = \frac{24}{Re_{ijk}} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_{ijk}}}, \quad \text{число Рейнольдса} \quad Re_{ijk} = \frac{\rho_{\Pi} d_{ijk} |\vec{V} - \vec{U}|_{ijk}}{\mu_{\Pi}}, \quad \text{деформація}$$

краплини враховується динамічним коефіцієнтом форми $\psi_{ijk} = \exp(0,03 \cdot We_{ijk}^{1,5})$, де

$$\text{число Вебера} \quad We_{ijk} = \frac{\rho_{\Pi} d_{ijk} |\vec{V} - \vec{U}|_{ijk}^2}{\sigma}; \quad \text{коефіцієнт масовіддачі краплини}$$

$$\beta_{ijk} = Sh_{ijk} \frac{D_{\Pi}}{d_{ijk}}; \quad \text{число Шервуда} \quad Sh_{ijk} = 2 + 0,55 \cdot Re_{ijk}^{0,5} \cdot Sc^{0,33}; \quad \text{число Шмідта}$$

$$Sc = \frac{\mu_{\Pi}}{D_{\Pi} \rho_{\Pi}}; \quad \text{коефіцієнт тепловіддачі краплини} \quad \alpha_{ijk} = Nu_{ijk} \frac{\lambda_{\Pi}}{d_{ijk}}; \quad \text{число Нусельта}$$

$$Nu_{ijk} = 2 + 0,55 \cdot Re_{ijk}^{0,5} \cdot Pr^{0,33}; \quad \text{число Прандтля} \quad Pr = \frac{\mu_{\Pi} C_{p\Pi}}{\lambda_{\Pi}}.$$

Теплофізичні властивості: ρ – густина; μ – динамічна в'язкість; λ – теплопровідність; C_p – теплоємність; D – дифузії водяної пари у повітрі; σ – поверхневий натяг; L – теплота пароутворення; ρ_{Π}^{θ} – густина насиченої водяної пари біля краплини; $\rho_{\text{в.}\Pi}$ – густина водяної пари в атмосфері, яка відповідає вологості повітря; властивості повітря позначено індексом Π ; θ , T – середньомасова температура краплини та повітря, відповідно.

Початкові умови для розв'язку рівнянь при $\tau = 0$:

$$V_{x\,ijk0} = |\vec{V}_0| \sin\alpha_j \cos\gamma_k + U_{\text{обпр}}, \quad V_{y\,ijk0} = |\vec{V}_0| \sin\alpha_j \sin\gamma_k, \quad V_{z\,ijk0} = |\vec{V}_0| \cos\alpha_j, \quad d_{ijk} = d_{ijk0}, \quad \theta_{ijk} = \theta_0.$$

До системи рівнянь входить швидкість повітря $U_{\text{в}}$, як невідома. Априорі приймаємо, що струмінь повітря, який формується у факелі рухається за законами круглого турбулентного струменю з постійною ефективною в'язкістю [4] і компонентами швидкості:

$$U_x = U_y = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3}{\pi}} \frac{\sqrt{K}}{z} \frac{\eta - 0,25\eta^2}{(1 + 0,25\eta^2)^2}, \quad U_z = \frac{3}{8\pi} \frac{K}{\varepsilon_0 z} \frac{1}{(1 + 0,25\eta^2)^2},$$

де $\eta = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3}{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{K}}{\varepsilon_0} \cdot \frac{x}{z}$ – приведена координата; $K = 2\pi \int_0^{\infty} U_z^2 x dx$ – кінематичний

імпульс, ε_0 - ефективна кінематична в'язкість.

В математичній моделі враховано швидкість обприскувача в компоненті $V_{x\,ijk0}$ і швидкість вітру в рівнянні кількості руху в компоненті $V_{x\,ijk}$. Теплофізичні властивості робочої рідини і повітря приймаємо в залежності від їх температури. Вологість повітря враховується через густину водяної пари та тиск у навколишньому середовищі. З розв'язку рівнянь отримаємо траєкторії і

швидкість руху краплин у факелі, температуру краплин і втрату маси через випаровування в залежності від метеорологічних умов обприскування.

Перевірку адекватності математичної моделі виконували для факела розпилювача РОса® з витратою рідини 1,0 л/хв при тиску 0,3 МПа.

Чисельне інтегрування рівнянь руху, збереження маси і енергії виконано при наступних вихідних даних: $|\vec{V}_0| = 12$ м/с; $d_{ijk0} = 17,1 - 338,3$ мкм; $\alpha_j = 11,4^\circ - 42^\circ$; $z = 0,6$ м; властивостях робочої рідини: $\rho = 988$ кг/м³; $\sigma = 0,073$ Н/м; $Cp = 4182$ Дж/(кг·К); $L = 2453,8$ кДж/кг; $\theta_0 = 20$ °С та повітря: $t_0 = 20$ °С; $\varphi = 60$ %; $\lambda_{\text{п}} = 0,025$ Вт/(м·К); $\mu_{\text{п}} = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $\rho_{\text{п}} = 1,2$ кг/м³; $Cp_{\text{п}} = 1007$ Дж/(кг·К); $\rho_{\text{ВП}} = (\rho_{\text{п}} \cdot \varphi)/100$; $\rho_{\text{п}} = 2336,8$ Па; $D_{\text{п}} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $K_0 = 0,407$ м⁴/с²; $\varepsilon_0 / \sqrt{K} = 0,0161$.

На рис. 2 співставлено спостерігаєму візуально і розрахункову форму факела. На відстані 0,5 м факел приймає форму циліндра і краплини рухаються вертикально. Тому робоча висота для розпилювача має бути $(0,6 \pm 0,1)$ м.

Швидкість краплин і повітря у факелі показано на рис. 3, 4.

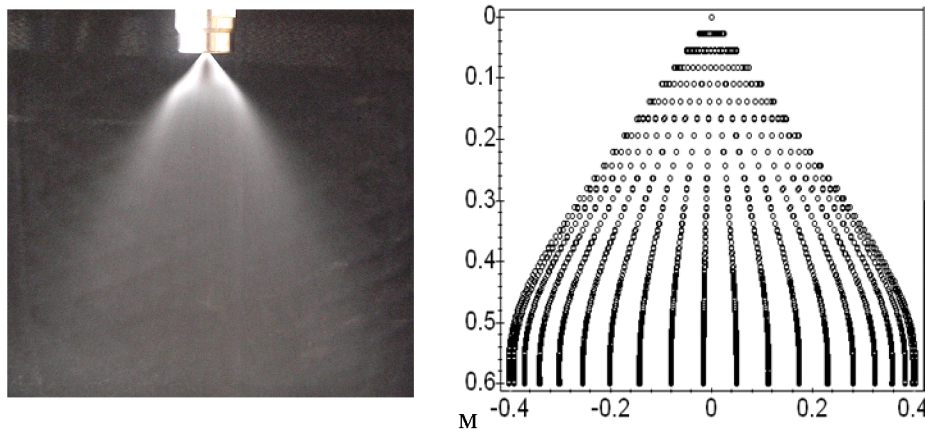


Рис. 2. Факел розпилювача.

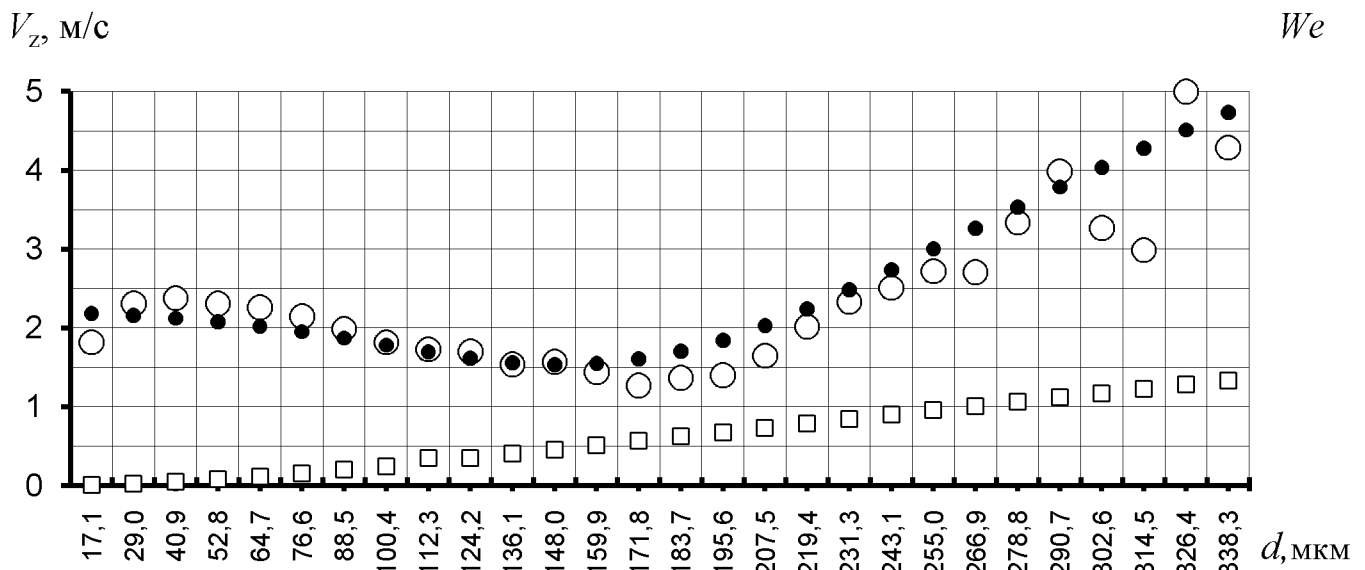
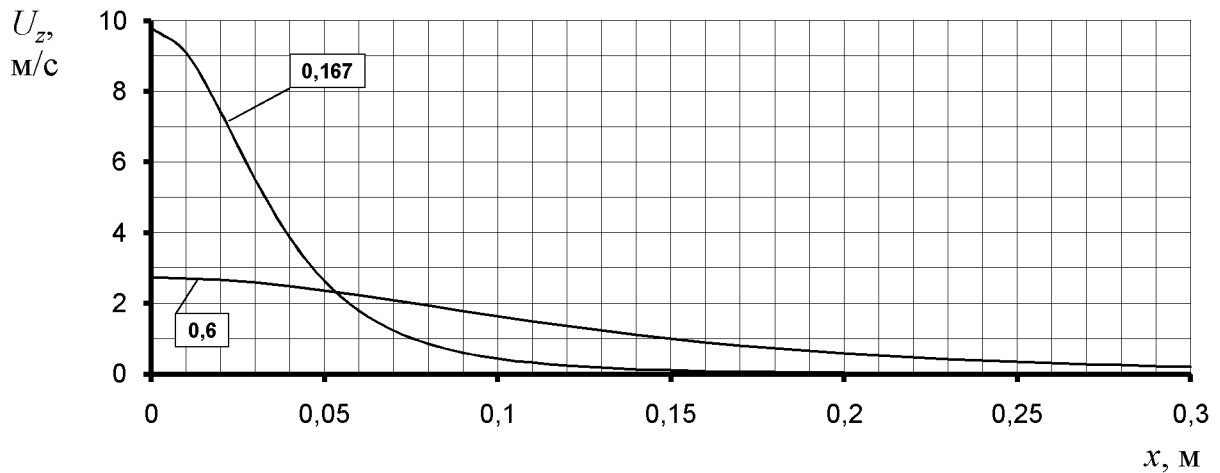
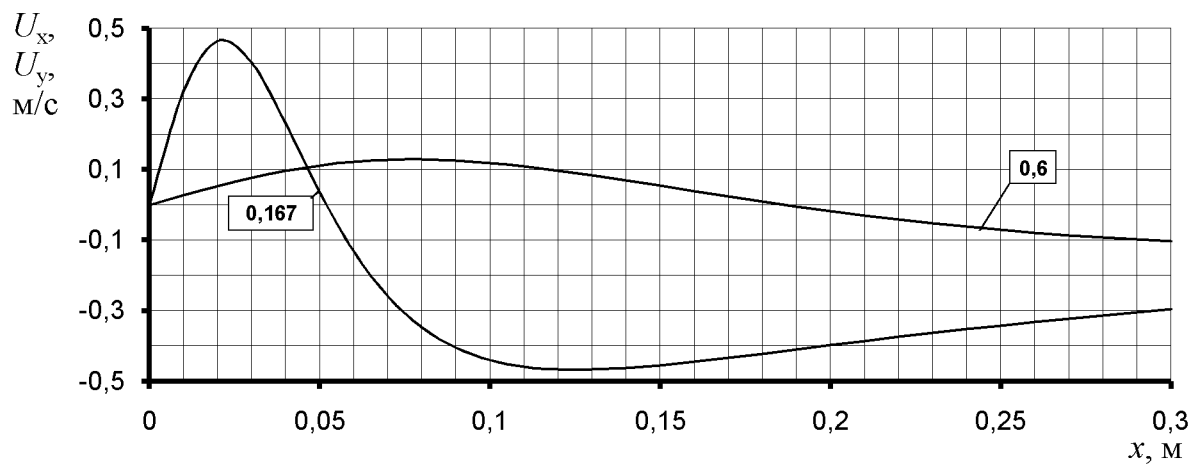


Рис. 3. Швидкість краплин: ● – розрахункова, ○ – експериментальна, □ – гравітаційне осідання.



а



б

Рис. 4. Швидкість повітря у факелі: а – осьова, б – радіальна.

Із рис. 3 видно, що краплини осаджуються зі швидкістю, що перевищує швидкість гравітаційного осідання

$$V = \frac{1}{18} \frac{\rho g}{\mu_{II}} d_k^2$$

Швидкість осаджування розрахункова і експериментальна відрізняється менш ніж на 10 %.

Швидкість повітря по осі факела на відстані 0,6 м зменшується до 2,7 м/с. Важливою для формування розподілу краплин у факелі важливою є радіальна швидкість, яка направлена від осі струменю, досягає максимального значення, після чого зменшується до нуля з утворенням лінії нульових швидкостей. Від зовнішньої поверхні струменю швидкість направлена до лінії нульових швидкостей. Радіальний рух повітря зумовлює зміщення дрібних

краплин з центральної і периферійної зони до лінії нульових радіальних швидкостей.

Співставлення швидкостей (рис. 3 і 4) свідчить, що малі краплини осаджуються примусово струменем повітря, що всмоктує факел. Ця властивість відцентрового розпилювача РОса® є визначальною для осаджування краплин.

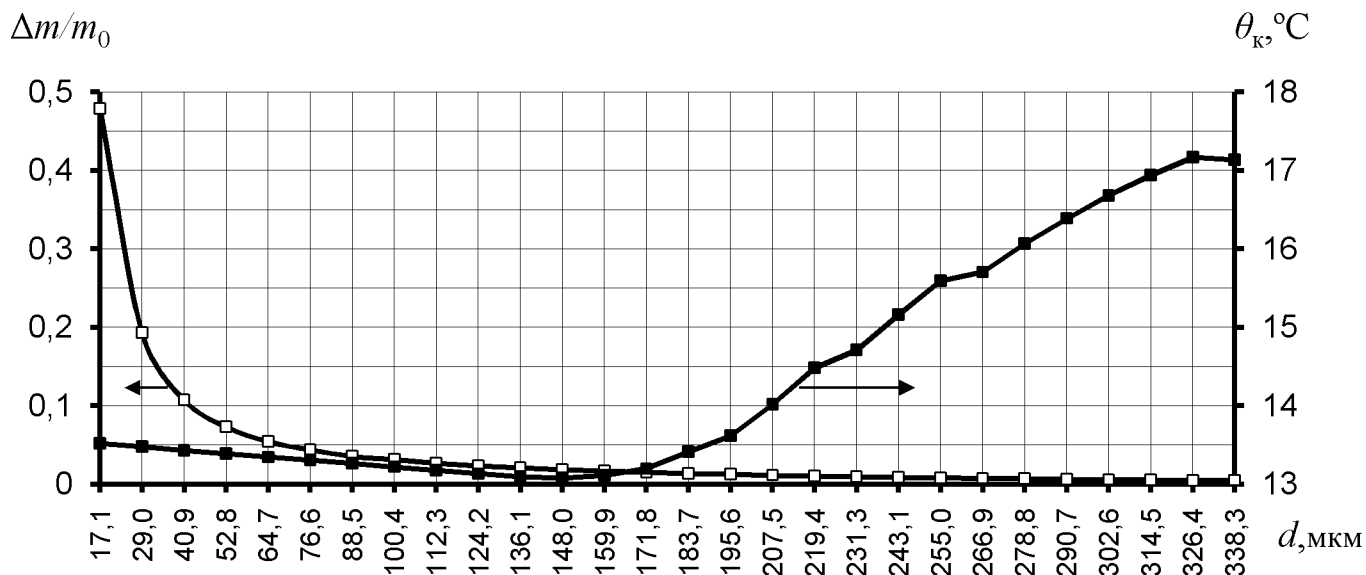


Рис. 5. Температура і втрата маси краплин у факелі через випаровування.

Внаслідок випаровування температура краплин менших за 183 мкм досягає рівноважної 13,2 °C для прийнятої у розрахунках вологості 60 % і температури повітря 20 °C. За розрахунками середньомасова температура краплин у факелі зменшується на 2,7 °C, при вимірюванні на 2,3 °C. Внаслідок зменшення часу польоту краплини не випаровується повністю. Так втрата маси краплин до 17,1 мкм не перевищує 50 %.

Узгодження розрахункової та експериментальної форми факела, швидкостей краплин і температури розпиленої рідини підтверджено адекватність математичної моделі.

3. Взаємодія краплини з твердою поверхнею.

Краплина при зіткненні з твердою поверхнею (рис. б) може: втриматися на ній (а, б); розплющитися і подрібнитися на краплини менших розмірів (в); відскочити (г) чи зісковзнути (д).

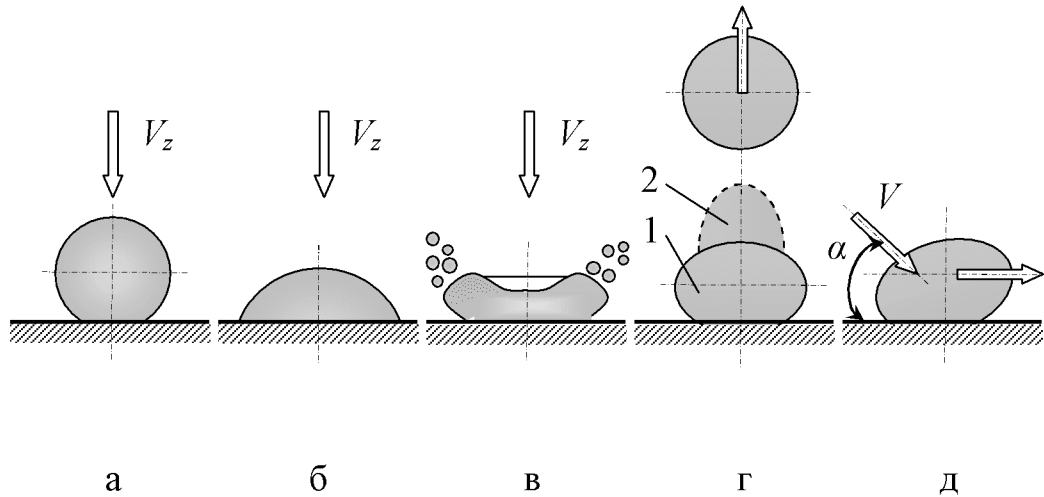


Рис. 6. Схема взаємодії краплини з твердою поверхнею при зіткненні.

Осаджування краплини за схемою а і б забезпечує ефективне використання пестициду, а за схемами в, г, д призводить до втрат пестициду.

Визначальним в осаджуванні є співвідношення кінетичної енергії $E_K = \frac{mV_z^2}{2}$, і поверхневої енергії краплини $E_{\Pi} = \sigma S$, де $m = \frac{1}{6}\pi d_k^3 \rho$ – маса краплини; d_k – діаметр краплини; ρ – густина рідини; V_z – швидкість зіткнення краплини; σ – поверхневий натяг; $S = \pi d_k^2$ – площа поверхні краплини.

За умови $E_K < E_{\Pi}$ краплина при зіткненні з твердою поверхнею залишається цілою і може утриматися, відскочити або зісковзнути, а за умови $E_K \geq E_{\Pi}$ краплина розплющується і подрібнюється. Із відношення енергій краплини

$$\frac{E_K}{E_{\Pi}} = \frac{1}{12} We ,$$

де число Вебера $We = \frac{d_k \rho V_z^2}{\sigma}$, отримаємо критичне при $E_K = E_{\Pi}$ $We_* = 12$ і критичну швидкість осаджування.

На рис. 7 показано швидкості осаджування краплин на відстані 0,5 м від сопла за умови тиску 0,3 МПа згідно з вимірюваннями компанії Lechler GmbH розпилювача P.03.0.6 і IDK 120-015.

Для розпилювача P.03.0.6 критичного числа $We_* = 12$ досягають краплини 210,0 мкм зі швидкістю 2,0 м/с, для IDK 120-015 – 97,1 мкм зі швидкістю 2,95 м/с.

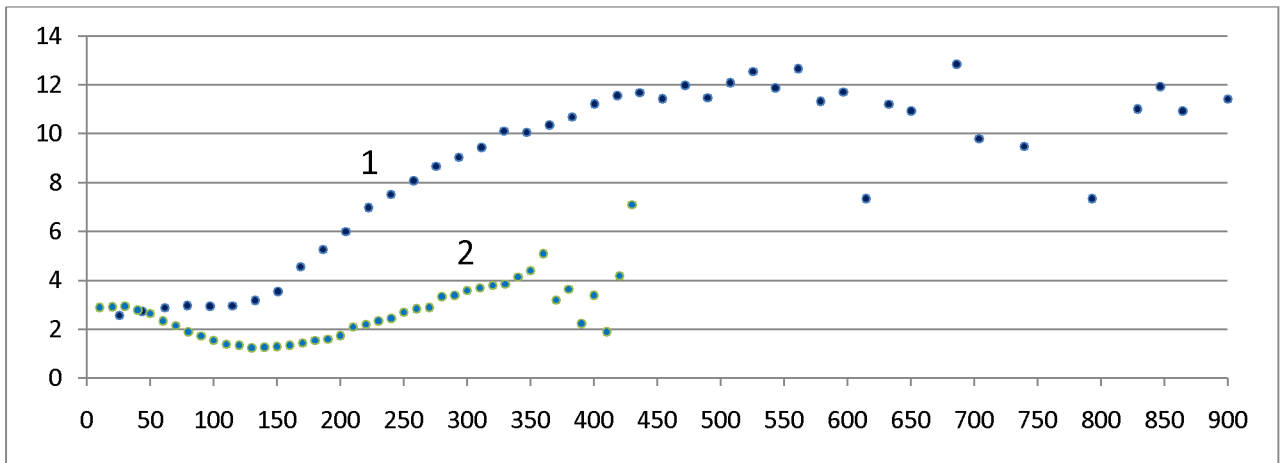


Рис. 7. Швидкості краплин у факелі розпилювача: 1 – IDK 120-015; 2 – P.03.0.6.

Математичне моделювання [5] показує, що краплина при зворотній деформації (рис. 6 г), може відскочити від поверхні, що не змочується. На поверхні, що змочується, така схема взаємодії не реалізується. Взаємодія (рис. 6 в, г, д) приводить до втрати робочої рідини і практичне значення мають схеми (рис. 6 а, б), коли краплина утримується на поверхні обробки. Деформація краплини залежить від поверхневого натягу σ на межі розділу фаз повітря, рідини і твердого тіла, як це показано на рис. 8.

Характеристикою змочування є крайовий кут θ , між дотичною АВ до поверхні рідини та поверхнею твердого тіла. Рівноважний крайовий кут θ_0 визначається за формулою Юнга:

$$\cos \theta_0 = \frac{\sigma_{ТП} - \sigma_{ТР}}{\sigma_{РП}},$$

де $\sigma_{ТП}$, $\sigma_{ТР}$, $\sigma_{РП}$ – поверхневий натяг між твердим тілом і повітрям, твердим тілом і рідиною, рідиною і повітрям, відповідно.

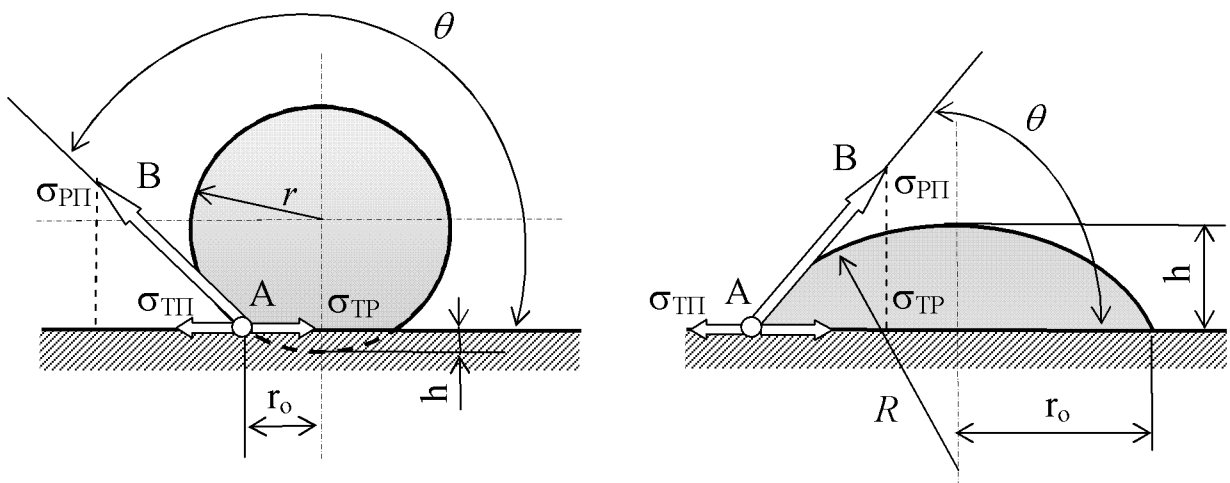


Рис. 8. Схема до розрахунку розмірів плями під осадженою краплиною.

У залежності від рівноважного крайового кута розрізняють поверхні, які погано змочуються $180^\circ > \theta > 90^\circ$ (рис. 8, а), змочуються – $90^\circ > \theta > 0^\circ$ (рис. 8, б) і

коли рівноважний крайовий кут не встановлюється $\theta \approx 0^\circ$, бо рідина розтікається у тонку плівку.

В таблиці 1 наведено дані Бенгтссона [6] про рівноважні крайові кути змочування верхньої сторони листків рослин.

Таблиця 1

Рівноважні крайові кути листків рослин

Рослина	θ_0 , град	Рослина	θ_0 , град
Культурна		Бур'ян	
Ячмінь яровий	$166 \pm 0,5$	Овсюк	$161 \pm 0,6$
Пшениця ярова	$164 \pm 0,7$	Осот жовтий	$160 \pm 1,5$
Люцерна	$140 \pm 1,9$	Лобода	$157 \pm 0,9$
Буряк кормовий	$56 \pm 3,0$	Кульбаба	$74 \pm 0,9$
Квасоля	$69 \pm 0,5$	Подорожник	$57 \pm 2,7$

З геометричної побудови (рис. 8) визначаємо площу плями під осадженою краплиною:

$$S_{пл} = \pi r_0^2.$$

Для поверхні зрошення, що не змочується, при $r_0 = R \sin \theta$ радіус кулі визначаємо через об'єм краплини, який залишається незмінним під час деформації:

$$\frac{1}{6} \pi d_k^3 = \frac{4}{3} \pi R^3 - \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h),$$

де висота сегменту кулі $h = R(1 + \cos \theta)$, а радіус осадженої краплини $R = d_k f_1(\theta)$, де функція змочування $f_1(\theta) = \frac{1}{\sqrt[3]{8 - 2(1 + \cos \theta)^2 \cdot (2 - \cos \theta)}}$, площа плями

$$S_{пл} = \pi d_k^2 f_1^2(\theta) \sin^2 \theta.$$

Для поверхні, що змочується:

$$\frac{1}{6} \pi d_k^3 = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h),$$

де висота сегменту кулі $h = R(1 - \cos \theta)$, відповідно $R = d_k f_2(\theta)$,

$$а f_2(\theta) = \frac{1}{\sqrt[3]{2(1 - \cos \theta)^2 \cdot (2 + \cos \theta)}}.$$

Функцію змочування в залежності від крайового кута показано на рис. 9. Площа плями краплини на поверхні, що змочується

$$S_{nl} = \pi d_k^2 f_2^2(\theta) \sin^2 \theta,$$

Площа поверхні зрошення, що покрита плямами краплин $S = \sum n_i S_{nl.i}$, де n_i – кількість краплин i -го діаметру, $S_{nl.i}$ – площа плями. Якщо обрахувати кількість краплин в об'ємі Q , осадженому на одиницю поверхні, через об'ємно-поверхневий діаметр, то $n = \frac{6Q}{\pi d_{32}^3}$, оскільки то —. Тому покращення дисперсності забезпечує збільшення площі плям і ефективність дії пестициду.

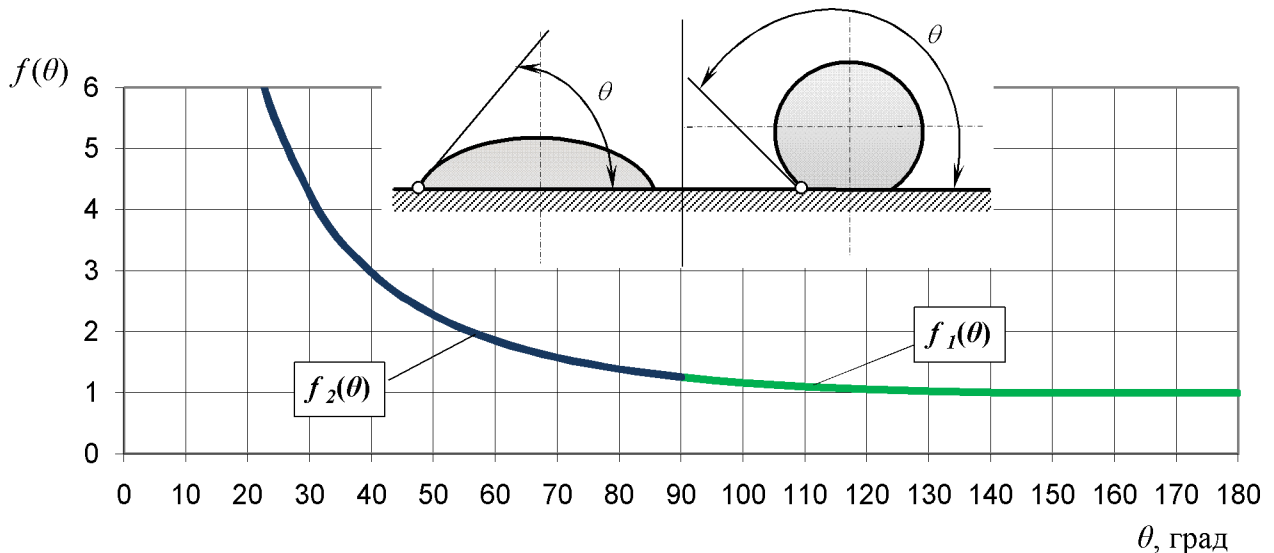
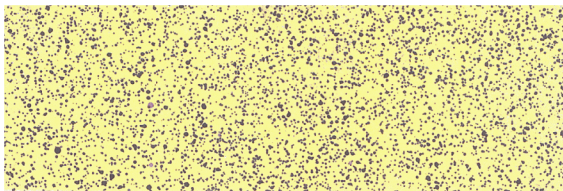
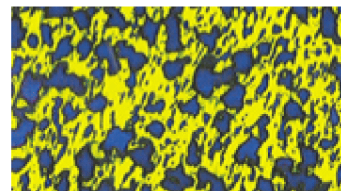


Рис. 9. Функція змочування.

На рис. 10, а показано покриття краплинами лабораторної картки розпилювача РОса[®] за умови тиску 0,3 МПа, витрати 0,32 л/хв та швидкості обприскувача 8,25 км/год і витратою рідини 47 л/га, а на рис. 10, б – сліди краплин розпилювача IDK 120-02 TwinSprayCar за умови тиску 0,3 МПа, витрати 0,78 л/хв та швидкості обприскувача 6,40 км/год і витратою рідини 300 л/га.



а



б

Рис. 10. Лабораторні картки після взаємодії розпиленої рідини розпилювачем: а – Ф.03.0.3; б – IDK 120-02.

Розпилювач РОса[®] принципово змінює ситуацію в обприскуванні. Замість змочування рослин слідами краплин він забезпечує їх рівномірне

осаджування з густотою покриття, що дозволяє працювати з витратою на гектар 20 л робочої рідини.

Література:

1. Редкозубов И. А. Теория и практика опрыскивания 2010 / И. А. Редкозубов, Ю. Ю. Ротенберг, Т. В. Раскатова, Р. Хайнкель. // ООО Дюпон Наука и технологии, 2010. – 19 с.
2. Симаков Н. Н. Кризис сопротивления капель при переходных числах Рейнольдса в турбулентном двухфазном потоке факела распыла механической форсунки / Н. Н. Симаков // Журнал технической физики. – 2004. Т. 74. вып. 2. – С. 46–51.
3. Мележик О. І. Відцентровий розпилювач пестицидів: рух і випаровування краплин у факелі / О. І. Мележик, О. В. Жевжик, А. С. Кобець // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2007. – № 1. – С. 97–101.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; [пер. с нем.]. М. : Наука, 1969 – 742 с.
5. Брич М. А. Математическое моделирование взаимодействия диспергированной жидкости с нагретыми поверхностями: автореф. дис. на получение науч. степени канд. физ.-мат. наук : спец. 01.04.14 "Теплофизика и молекулярная физика" / М. А. Брич. – Минск, 1987. – 22 с.
6. Соколов М. С. Факторы, влияющие на эффективность гербицидов при послевсходовом применении: Обзор литературы. / М. С. Соколов, В. В. Изубенко – М. : Минстрой СССР, 1969. – 72 с.