

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНЮ МАТЕРІАЛІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ МЕТОДОМ РОЗПИЛЕННЯ

В статті розглянуто модель розпилення матеріалу при його нанесенні на поверхню деталей легкої промисловості. Розроблені аналітичні залежності були підтверджені експериментально. Для цього було виготовлено спеціальне обладнання. Параметри для розрахунків: початкова температура газу і рідини, абсолютний тиск в апаратах, початкова швидкість газу (або витрата), початкова концентрація пилу і компонента в газі і рідині, витрата рідини.

Ключові слова: модель, розпилення

S.L. HORIASHCHENKO
Khmelnitsky National University

SIMULATION OF COATING MATERIAL SURFACE LIGHT INDUSTRY SPRAY

In the article the model of spray material during its deposition on the surfaces of light industry. Analytical dependences have been confirmed experimentally. This was made special equipment. Parameters for the calculations: the initial temperature of the gas and liquid, the absolute pressure in the apparatus, the initial gas velocity (or flow), the initial concentration of dust and component in the gas and liquid flow rate. In the cases we discussed mode refers to the flow of thin films in the pipes with a coefficient of drag of 0.05

Keywords: model, spraying

Актуальність роботи. Нанесення плівок на текстильні матеріали є складним процесом, що залежать від цілого ряду чинників: структури матеріалу, виду волокна, дифузійної здатності барвника, добавок електроліту, температури полімеру, що наноситься.

Найбільш поширений метод одержання покриттів – використання обладнання, що працює за рахунок розпилення: пневматичного, безповітряного, комбінованого і електростатичного.

Якість покриття, економічність нанесення, продуктивність нанесення є основні технологічні параметри. Факел, його форма, дисперсність крапель фарби, швидкість потоку суміші, розподіл щільності фарби по плямі є параметри, що визначає якість покриття. Економічність залежить від двох параметрів: масопереносу - відношення матеріалів, що беруть участь в утворенні покриття і витрат при утворенні туману; мінімальна товщина плівки. Тому доцільно використовувати пневматичні розпилювачі, що здатні розпилювати полімери. Великий економічний ефект може дати використання пневматичних розпилювачів з здатністю зміни розпилюючих насадок. Це дасть змогу змінювати дисперсність капель, форму і розміри факелу для нанесення покриття на різні за формою деталі з мінімальними витратами матеріалів і часу.

Основна частина. Розпилювання полімеру, що витікає з деякого отвору в простір, заповнений газом, є результатом взаємодії потоку рідини і навколишнього газового середовища. Ця взаємодія вельми складна, так як розпадається не тільки власне струмінь, але й окремі первинні краплі. Початковими умовами для розглянутого потоку є умови організації його виходу з форсунки. Ці умови визначаються геометричній конфігурацією камери і отвору форсунки а також кінцевою швидкістю струменя.

У самому загальному випадку, як і будь-яка течія в газорідинній системі, даний процес описується рівняннями руху фаз та умовами їх взаємодії на межах розділу [1]. При цьому в силу значних швидкостей рідкої струменя в рівняннях руху можна знехтувати гравітаційними силами в порівнянні з силою інерції.

Крім того, в області, охопленій процесом дроблення, потік рідкої фази створює в навколишньому газі дуже інтенсивні турбулентні збурення [2]. У зв'язку з цим можна знехтувати також силами молекулярного тертя в газовій фазі. Приймаючи до уваги всі вищезгадані допущення, можемо записати основну систему рівнянь в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} -\text{grad } p' + \mu' \cdot \nabla^2 \cdot \omega' &= \rho' \cdot \frac{D \cdot \omega'}{dt}; \text{div } \bar{\omega}' = 0; \\ -\text{grad } p'' &= \rho'' \cdot \frac{D \cdot \bar{\omega}''}{dt}; \text{div } \bar{\omega}'' = 0; \\ \mu' \cdot \left(\frac{\partial \omega' \cdot i}{\partial x_k} + \frac{\partial \omega' \cdot k}{\partial x_i} \right)_{ep} &= -\rho'' \cdot (\bar{v}_i'' \cdot \bar{v}_k'')_{ep}; \\ p' - 2 \cdot \mu' \cdot \left(\frac{\partial \omega'_k}{\partial x_k} \right)_{ep} &= p'' - \rho'' \cdot (\bar{v}''^2)_{ep} + \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \\ \bar{\omega}'_{ep} &= \bar{\omega}''_{ep}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де v_i'' і v_k'' - пульсаційні складові швидкості.

Ці рівняння дають наступні первинні критерії подібності:

$$\frac{\Delta p}{\rho' \cdot \omega'^2}, \frac{\omega' \cdot l}{\nu'}, \frac{\rho'' \cdot \omega''^2}{\rho' \cdot \omega'^2}, \frac{\Delta \cdot p \cdot l}{\sigma}, \frac{\omega'}{\omega''}. \quad (2)$$

В умови однозначності розглянутого процесу входять геометричні розміри форсунки, швидкості течії фаз і фізичні константи, що містяться в рівняннях (1). Складемо звичайним способом комбінації з критеріїв (2) так, щоб виділити найбільше число комплексів, складених лише з величин, що входять в умови однозначності. Маємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta p l}{\sigma} \cdot \frac{\rho'' \omega''^2}{\rho' \omega'^2} \cdot \frac{\rho' \omega'^2}{\Delta p} &= \frac{\rho'' \omega''^2 l}{\sigma}; \\ \frac{\Delta p l}{\sigma} \cdot \frac{\rho' \omega'^2}{\Delta p} \cdot \left(\frac{\nu'}{\omega' l} \right)^2 &= \frac{\mu'^2}{\sigma \rho' l}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Як наслідок, системі (2) еквівалентна система

$$\frac{\Delta p}{\rho' \cdot \omega'^2}, \frac{\mu'^2 \cdot l}{\sigma \rho' l}, \frac{\rho'' \cdot \omega''^2 l}{\sigma}, \frac{\rho'' \cdot \omega''^2}{\rho' \cdot \omega'^2}, \frac{\omega'}{\omega''}. \quad (4)$$

Чотири з цих критеріїв є визначальними. Очевидно, що процес подрібнення відбувається тим інтенсивніше, чим значніше динамічна взаємодія струменя і газу [1]. Ця взаємодія залежить від їх відносної швидкості. Тому доцільно в критерії (4) ввести замість абсолютної швидкості газу його відносну швидкість $\omega = \omega'' - \omega'$. З урахуванням цієї обставини можемо написати, що будь-який визначуваний критерій процесу розпилювання для геометрично подібних форсунок є деякою функцією наступних визначальних безрозмірних параметрів:

$$\frac{\mu'^2}{\sigma \rho' l}, \frac{\rho'' \cdot \omega''^2 l}{\sigma}, \frac{\rho'' \cdot \omega''^2}{\rho' \cdot \omega'^2}, \frac{\omega'}{\omega''} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^2, \frac{\omega'}{\omega}. \quad (5)$$

Факел розпиленої рідини будемо розглядати як відкриту для зовнішніх впливів систему рухомих і взаємодіючих крапель (утворених розпилюючим пристроєм) і суцільного середовища.

Таким чином, в кожній точці простору рух як суцільної так і дисперсної фаз залежить від внутрішніх причин (міжфазової взаємодії і зовнішніх (взаємодія факела і зовнішнього середовища).

У найбільш загальному випадку сукупність дисперсних частинок, випромінюваних точковим джерелом (розпилювачем) поширюється усередині об'єму викривленого конуса, як показано на Рис. 1, а [4].

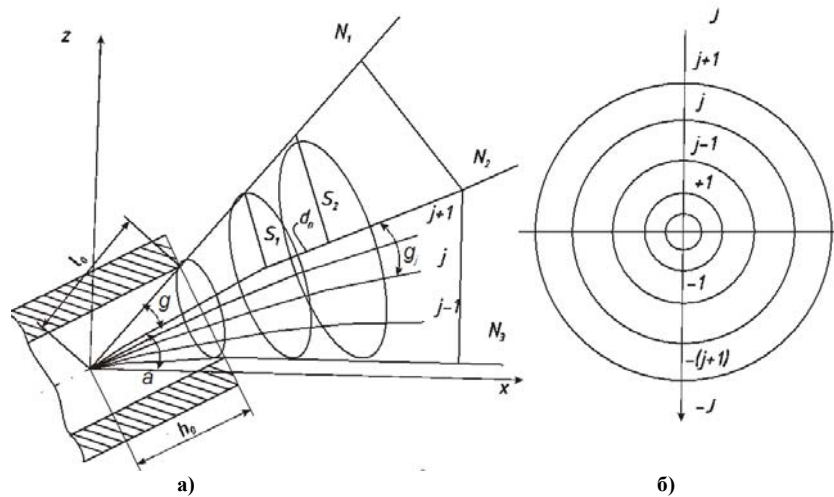


Рис. 1. Розрахункова схема вільного факела

Елементарний струмінь, який в початковий момент часу ділить кореневої кут навпіл, назвемо центральним (лінія ON_2).

Розглянемо об'єм факела, що займає простір між двома близькими площинами, для кожної з яких центральна лінія струменя є нормаллю.

Припустимо, що перетин факела нормальної площиною є кругом. тоді об'єм «зрізу» факела між двома площинами може бути обчислений як об'єм елементарного циліндра $dV = S d_n$ (де d_n - відстань між центрами кіл).

Перетин факела зручно визначити як сукупність точок рідкої фази, що одночасно і з однаковою швидкістю залишили розпилювач [2]. З достатньою для практики точністю площу цього перерізу можна розраховувати як площу деякого еквівалентного кола.

Відповідний скалярний добуток $\bar{S} \bar{\omega}$ представляємо як $s \omega_{p_2}$ (де ω_{p_2} - проекція швидкості рідкої фази центральної струмені на напрямку руху рідини). Об'ємна щільність масової сили, що діє на рідку фазу,

\vec{f}_g , дорівнює $\beta \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot \vec{g}$, а сила опору відносному руху фаз $-\vec{f}_c$. Тоді при достатньо рівномірному розподілі рідини по перетину для довільного моменту часу отримуємо:

$$\beta = \frac{\beta_0 \cdot \omega_0 \cdot S_0}{\omega \cdot S} = \frac{G_p}{\omega S} \quad (6)$$

Вираз (6) в записі для дисперсної фази має вигляд:

$$\frac{d\vec{\omega}_p}{d\tau} = \frac{1}{\beta \cdot \rho_p} \cdot (\vec{f}_g - \vec{f}_c) \quad (7)$$

Рівняння (7) в записі для суцільної фази дозволяє непрямим шляхом оцінити траєкторії газу всередині факела. Якщо в деякий момент площа перерізу факела дорівнює S^* , а витрата газу через S^* дорівнює G_r^* , то можна записати:

$$\varepsilon^* \cdot \rho_r \cdot \omega_r \cdot S^* = \varepsilon \cdot \rho_r \cdot \omega_r \cdot S_r = \rho_r \cdot G_r \quad (8)$$

звідки

$$S_r = G_r^* / \varepsilon \cdot \omega_r = \pi r_r^2 \quad (9)$$

Приймаючи табличне значення $\varepsilon = 1$ [2] обчислюємо: $r_r = \sqrt{G_r^* / (\pi \varepsilon \omega_r)}$

$$r_r = \sqrt{0,00635 / (3,14 \cdot 1 \cdot 150)} = 0,004$$

Введемо позначення для кожної j -тої струменя проекції імпульсу газової фази на i -ту вісь координат ($i \in x, z$), тобто проекції вектора, що стоїть під знаком диференціала, записаному для газової фази: $\varepsilon \rho_r \cdot \omega_{ij} \cdot \omega_{ij} \cdot S = G_{ij}$

Якщо величини G_r , відомі (спочатку з початкових умов, потім - в результаті попереднього кроку обчислень), то легко знайти швидкості газу для будь-якого з струменів:

$$(\varepsilon \rho_r \cdot \omega_{xj} \cdot \omega_{xj} \cdot S)^2 + (\varepsilon \rho_r \cdot \omega_{zj} \cdot \omega_{zj} \cdot S)^2 = (\varepsilon \rho_r \cdot S)^2 \cdot \omega_{rj}^2 = G_{rxj}^2 + G_{rzj}^2 \quad (10)$$

Звідки

$$\omega_{rj} = \sqrt{G_{rxj}^2 + G_{rzj}^2} \cdot \frac{1}{\varepsilon \rho_r S}$$

Для кожного j -тої струменя знаходимо значення проектної ω_{rxj} і ω_{rzj} :

$$\omega_{rxj} = \frac{G_{rxj}}{\varepsilon \rho_r S \omega_{rj}} \quad \omega_{rzj} = \frac{G_{rzj}}{\varepsilon \rho_r S \omega_{rj}}$$

Щоб обчислити коефіцієнт опору, знаходимо модуль відносної швидкості для кожного з j струменів:

$$\omega_{0xj} = \omega_{жxj} - \omega_{rxj}; \quad \omega_{0zj} = \omega_{жzj} - \omega_{rzj};$$

$$\omega_{0j} = \sqrt{\omega_{0xj}^2 + \omega_{0zj}^2} \quad (11)$$

Далі підраховуємо коефіцієнт опору і об'ємні щільності сил, що діють на фази:

$$f_{cxj} = f_{cj} \cos(\omega_{жxj} \wedge \omega_{жzj}) = f_{cj} \frac{\omega_{0xj}}{\omega_{0j}}; \quad f_{жxj} = -f_{cxj}; \quad f_{жzj} = -f_{czj}; \quad f_{Гij} = -f_{cij} \quad (12)$$

Рівняння збереження кількості руху для газової фази має вигляд:

$$\frac{dG_{Гij}}{d\tau} = f_{cij} \quad (13)$$

Інтегруючи шість рівнянь (13), записаних для двох проекцій кожного з трьох струменів, отримаємо значення $G_{Гij}$ для наступного кроку обчислень. Щоб визначити швидкості рідкої фази, запишемо рівняння (8) для кожної проекції.

$$\frac{d\omega_{жxj}}{d\tau} = -\frac{f_{cxj}}{\beta \rho_r \omega_{жxj}}; \quad \frac{d\omega_{жzj}}{d\tau} = -\frac{(-f_{czj} + f_g)}{\beta \rho_r \omega_{жzj}} \quad (14)$$

За відомими проекціями швидкостей рідини, інтегруємо рівняння для знаходження координат точок всіх струменів:

$$\frac{dx_j}{d\tau} = \omega_{жxj}; \quad \frac{dz_j}{d\tau} = \omega_{жzj} \quad (15)$$

Швидкість рідини до моменту τ_1 вважаємо незмінною. Відстань $l = l_1 - l_0$ вибираємо з умови існування факела, що складається з крапель рідини і відповідно щільного укладання куль, тобто $\beta = 0,4$. Якщо

$$S(l) = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (1 - \cos \gamma); \quad d = 2 \cdot (l + l_0) = 2 \cdot \left(l + \frac{dc}{2 \cdot \sin \gamma} \right)$$

Тоді

$$l = (d_c / 2 \sin \gamma) \cdot (\sqrt{1/\beta} - 1); \quad l_1 = l_0 + l = \frac{d_c}{2 \sin \gamma} \cdot \sqrt{\frac{1}{\beta}} \quad (16)$$

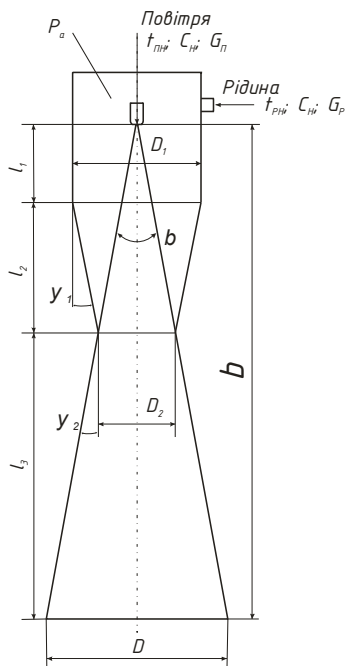


Рис. 2. Схема завдання початкових умов для розрахунку по моделях

Для перевірки було розроблено пристрій для розпилення, якій показано на рис.3. Також були виготовлені різні сопла діаметром 40, 60 та 50 мм. Проведені експериментальні дослідження показали правильність аналітичної моделі. Результат графічного порівняння представлено на рис.4. Приклад нанесення деталей взуття типу «Язичок» на рис.5.



Рис. 3. Фото пристрою для розпилення рідини

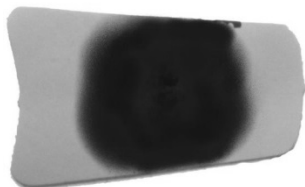


Рис. 5. Приклад нанесення полімеру на деталі взуття

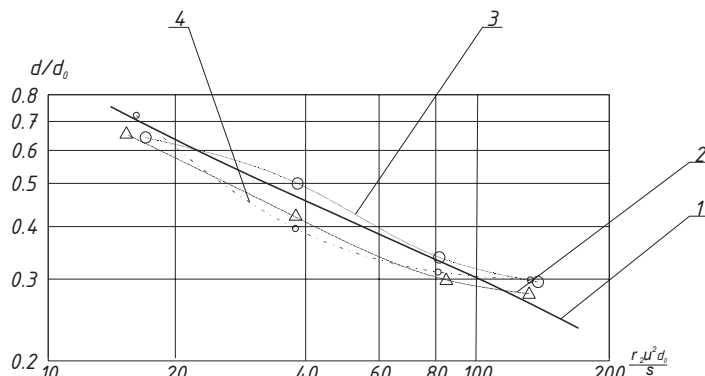


Рис. 4. Графіки залежності діаметрів капель від параметрів розпилення на різній відстані від сопла. 1 – теоретичний; 2 – 40 мм; 3 – 60 мм; 4 – 50 мм.

Висновки.

Отримані залежності були підтвержені експериментальними перевірками.

Розроблена модель є корисною для проведення пошукових досліджень щодо підбору оптимальної конструкції і компоновки пристрою для розпилення полімерів, а також може використовуватись в навчальних цілях та для визначення механічних і фізичних характеристик пристрою.

Література

1. Витман Л.А. Распыление жидкости форсунками / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев Л. // “Государственное энергетическое издание”, 1962.
2. Пажи Д.Г. Основы техники распыления жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов М. // Химия,

1984.

3. Базаров В.Г. Динамика жидкостных форсунок / В.Г. Базаров. — М.: Машиностроение, 1979.
4. Бетчелор Дж. Введение в динамику жидкости / Бетчелор Дж. Пер. с англ. под ред. О. Ф. Васильева. М., Мнр, 1973.
5. Horiashchenko S. Modeling and research of polymer coating on clothing materials / S. Horiashchenko, G. Paraska, S. Petegerych. // Innovation in textile materials&protective clothing. Monograph, Warsaw, 2012, с.151-159
6. Horiashchenko S.L. Stregth of adhesion on object with capillary-porous strukture / S.L. Horiashchenko. - сб. трудов ; 4 україно-польских наукових діалогів, 11-14.10.2011 р.

References

1. L.A. Vitman, B.D. Kacnel'son, I.I. Paleev "Raspylenie zhidkosti forsunkami" L., "Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdanie", 1962.
2. D.G. Pazhi, V.S. Galustov "Osnovy tehniki raspylenija zhidkostej" M., "Himija", 1984.
3. Bazarov V.G. "Dinamika zhidkostnyh forsunok" — М.: Mashinostroenie, 1979.
4. Betchelor Dzh. Vvedenie v dinamiku zhidkosti. Per. s angl./Pod red. O. F. Vasil'eva. M., Mnr, 1973. 5. Modeling and research of polymer coating on clothing materials. S. Horiashchenko, G. Paraska, S. Petegerych. // Innovation in textile materials&protective clothing. Monograph, Warsaw, 2012, с.151-159
5. Horiashchenko S.L. Stregth of adhesion on object with capillary-porous strukture. - сб. трудов ; 4 україно-польских наукових діалогів, 11-14.10.2011 р.

Рецензія/Peer review : 3.8.2014 р. Надрукована/Printed :30.9.2014 р.
Рецензент: д.т.н., проф. І.В. Троцишин