

**МОДЕЛЮВАННЯ КРАПЛІН ПРИ  
РОЗПИЛЕННІ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ СОПЛОМ**

*В статті розглядається основні параметри, що необхідні для моделювання потоку полімеру, який розпилюється потоком повітря. Визначені критерії формування краплін. Змодельоване формування крапліни полімеру при дії повітря в соплі.*

*Ключові слова: полімер, сопло, розпилення, моделювання*

S.L. HORIASCHENKO  
Khmelnitsky National University

**MODELING DROPS WHEN SPRAYING TWO-PHASE FLOW NOZZLE**

*In the article, the basic parameters required for modeling the flow of polymer that is sprayed air flow. The criteria forming droplets. Modeled the formation of polymer droplets when exposed to the air nozzle.*

*Key words: polymer nozzle spray simulation*

**Постановка завдання дослідження**

Розпилення рідини широко застосовується в сучасній техніці. Воно здійснюється, наприклад, в хімічній і харчовій промисловості при екстрагуванні твердих речовин з рідин, при сушінні, при різного роду взаємодіях між рідинами і газами, а також у ряді інших технологічних процесів (дроблення пульпи в алюмінієвій промисловості, охолодження газів розпорошеної рідиною в ряді апаратів і т. д.). Настільки поширене застосування розпилення пояснюється тим, що у всіх цих процесах зменшення розмірів крапель різко збільшує коефіцієнт теплопередачі і, отже, зменшує час протікання процесу, що дозволяє значно зменшити габарити апаратів. Крім того, розпилення забезпечує більшу рівномірність розподілу рідини і кращу взаємодію її з реагуючої середовищем.

Рівномірний розподіл рідини і економія диспергуемого матеріалу забезпечили успіх принципу тонкого розпилювання фарбувальних речовин в будівельній та інших галузях промисловості. Розпилювачі знайшли значне застосування при обприскуванні рослин у сільському господарстві. Листя рослин на сотнях тисяч гектарів щорічно покриваються дрібними краплями спеціальних хімічних складів, призначених для боротьби з шкідниками сільськогосподарських культур. У всіх цих випадках застосовуються форсунки, пристосовані для дрібного і по можливості рівномірного розподілу рідини по перетину струменя.

Величезне значення розпилювання рідини для вирішення ряду технічних завдань призвело до створення великої кількості всіляких конструкцій сопла. З'явилися і численні дослідження сопла. Більшість цих досліджень мало приватний характер, ставлячись тільки до даного конкретного типу сопла. Разом з цим були поставлені і дослідницькі роботи з відшукування загальних закономірностей, які можна було б поширити не тільки на випробуваний тип форсунки при зміні її продуктивності та умов роботи, але і на інші форсунки, що діють за тим же принципом.

Відомі два основних способи розпилювання рідини: механічний і пневматичний (або паровий). У відповідності з цим і форсунки діляться на дві великі групи: механічні та пневматичні (або парові). В останні роки стали застосовувати форсунки комбінованого типу, так звані летюче- (паро-) механічні, а також форсунки з попередньою газифікацією.

З'явилася останнім часом тенденція до створення повітряно - механічних сопла пояснюється прагненням використовувати переваги обох способів розпилювання рідини. Такі комбіновані форсунки відрізняються деякою заплутаністю конструкції, але зате витрати повітря у них дуже малі, а тиск його повітряному тракту не перевищує 2 атм.

**Основна частина**

Основними параметрами, що визначають режим роботи сопла, є:

- а) натиск рідини перед соплом; знаючи продуктивність форсунки і натиск, можна розрахувати насосне обладнання;
- б) швидкість розпилюючого газу - для пневматичних сопла; розрахунок втрат напору у соплах з газовому (паровому) тракту дає можливість підібрати нагнітач для подачі повітря або визначити тиск пари, що подається в форсунку;
- в) співвідношення між ваговими витратами рідини і газу в пневматичних соплах;
- г) протитиск в камері.

Знаючи продуктивність і задавшись швидкістю, можна визначити діаметр рідинного сопла форсунки, а в пневматичних соплах також і розміри щілини для газу.

Щоб розрахувати (або підібрати) форсунку, необхідно розпорядженні наступними вихідними даними і основними технічними вимогами:

- а) продуктивність форсунки (витрата рідини)  $G$ , кг! годину \

- б) необхідна зона розпилювання, обумовлена середовищем та діаметром крапель в струмені і розподілом крапель за розмірами;  
 в) кут конусності струменя;  
 г) щільність зрошення, т. е. кількість рідини, про-ходить в одиницю часу через одиницю площі живого перерізу струменя;  
 д) далекобійність струменя.

Важливу роль у розрахунку сопла відіграє визначення середнього діаметра крапель, для чого існує ряд формул:

- 1) середньоарифметичний діаметр:

$$d_{ap} = \frac{\sum n_i d_i}{N},$$

де  $n_i$  - число крапель діаметра  $d_i$ ,  $N_i = \sum n_i d_i$

сума всіх крапель; при такому методі усереднення питомий вміст крапель визначається їх відносною кількістю; між тим велика кількість малих крапель становить лише незначну частину загальної маси розпиленої рідини, а це означає, що таке середнє не враховує розподілення маси рідини по краплях;

- 2) середньомасовий діаметр:

$$d = \frac{\sum g_i d_i}{G} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3},$$

де  $g_i$  - вага крапель розміру  $d_i$

в деяких випадках за середній приймається розмір краплі, ставлення обсягу якої до її поверхні дорівнює відношенню сумарного обсягу всіх крапель до їх поверхні (середній діаметр по Заутер):

$$d_s = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3},$$

- 3) середній діаметр виводять також з умови, що відношення діаметра краплі середнього розміру до її об'єму дорівнює відношенню суми всіх діаметрів крапель до обсягу всіх крапель:

$$d_p = \sqrt{\frac{1}{\sum \frac{V_i}{d_i^2}}},$$

за середній можна приймати також діаметр краплі, об'єм якої дорівнює середньоарифметичному обсягу всіх крапель:

$$d_V = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i}},$$

середнім можна вважати також діаметр краплі, поверхні якої дорівнює середньоарифметичній поверхні всіх крапель:

$$d_F = \sqrt{\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i}};$$

- 4) середньологарифмічний діаметр:

$$l g d_i = \frac{\sum g_i l g d_i}{G},$$

медіанний діаметр  $d_m$  визначається як діаметр краплі, що ділить весь обсяг розпиленого струменя на дві рівні частини, т. е. на сумарні обсяги крапель:

$$\sum_{i=1}^m n_i d_i^3 = \sum_{i=m+1}^n n_i d_i^3$$

розміри яких більше або менше  $d_m$ .

Вибір того чи іншого способу визначення середнього діаметра крапель залежить від тих цілей, для яких виконується розпилювання рідини.

Середній діаметр крапель характеризує дисперсність далеко не повністю, оскільки при одному і тому ж середньому діаметрі можливі різне розподілення крапель за розмірами. Тому необхідно знати також і це розподіл, яке визначається за допомогою різних емпіричних формул. Досить поширеною є формула:

$$l g R_i = -\left(\frac{d_i}{d_0}\right)^m = -b d_i^m$$

де  $m$  і  $d$  - емпіричні константи;

$d_0$  - розмір крапель, відповідний, дорівнює 0,376;  $R_i$  - вагова частка рідини, що складається з

крапель, розміри яких більше  $d_L$ .

Рух рідкої струменя в середовищі газу описується рівнянням руху і нерозривності кожної фази та умовами на межі розділу фаз. У векторній формі ці рівняння записуються в наступному вигляді

$$\rho \bar{F} - \text{grad} p + \mu \left( \nabla^2 + \frac{1}{3} \text{grad} \text{div} \bar{g} \right) = \rho \left[ \frac{\partial \bar{g}}{\partial t} + \left( \bar{g}, \text{grad} \right) \bar{g} \right];$$

рівняння нерозривності;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \left( \bar{g} \rho \right) = 0$$

Тут  $F$  - об'ємні сили, що діють на одиницю маси. Коли об'ємною силою є вага, то

$$\bar{F} = \rho \bar{l} ,$$

де  $g$  - прискорення сили тяжіння);  $q$  - щільність середовища;  $i$  - в'язкість середовища;  $p$  - тиск;  $\nu$  - швидкість;  $t$  - час.

У разі нестисливого середовища щільність постійна ( $q = \text{const}$ ), рівняння (2-1) і (2-2) спрощуються і приймають вигляд:

$$\rho \bar{g} - \text{grad} p + \mu \nabla^2 \bar{g} = \rho \left[ \frac{\partial \bar{g}}{\partial t} + \left( \bar{g}, \text{grad} \right) \bar{g} \right]$$

$$\text{div} \bar{g} = 0$$

Поверхневий шар за своїми властивостями в значній мірі відрізняється від решти об'єму рідини внаслідок того, що молекули цього шару знаходяться під дією силових полів молекул різних середовищ. У результаті на молекули поверхневого шару діє сила, спрямована перпендикулярно до поверхні всередину рідини, - молекулярне тиск. Товщина поверхневого шару вельми мала і становить величину порядку молекулярних розмірів. Внаслідок дії молекулярного тиску поверхневий шар рідини аналогічний розтягнутій плівці, яка прагне стиснутися. Цьому стисненню перешкоджають сили, дотичні до поверхні рідини, звані силами поверхневого натягу

Тоді граничні умови перетворюються до вигляду

$$\left( g_{xz} \right)_{жс} = \left( g_{xz} \right)_z$$

$$g_{yжс} = g_{yz} = 0$$

$$\tau_{zy} = \mu_{жс} \left( \frac{\partial g_{xжс}}{\partial y} + \frac{\partial g_{yжс}}{\partial x} \right) = \mu_z \left( \frac{\partial g_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial g_{yz}}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \mu_{жс} \left( \frac{\partial g_{yжс}}{\partial y} + \frac{\partial g_{zжс}}{\partial x} \right) = \mu_z \left( \frac{\partial g_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial g_{zz}}{\partial x} \right)$$

$$p_{жс} + 2\mu_{жс} \frac{\partial g_{yжс}}{\partial y} = p_z + 2\mu_z \frac{\partial g_{yz}}{\partial y} + \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Для подальшого дослідження потоку частин полімеру, що розпилюється повітрям проведемо моделювання такого двофазного середовища.

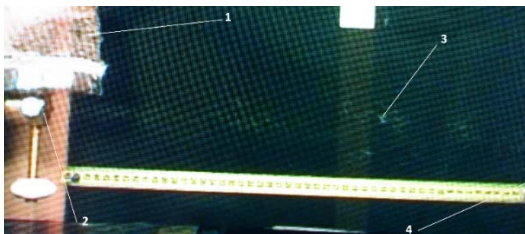


Рисунок 1. Експериментальна установка для розпилення полімеру. 1- Бак з полімером; 2 – сопло; 3 – потік; 4 – мішень.

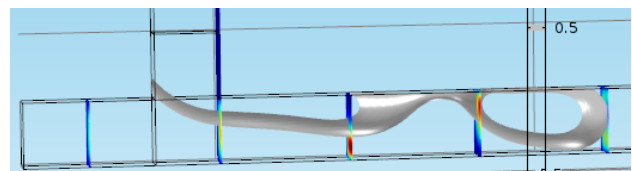


Рисунок 2. Формування краплини

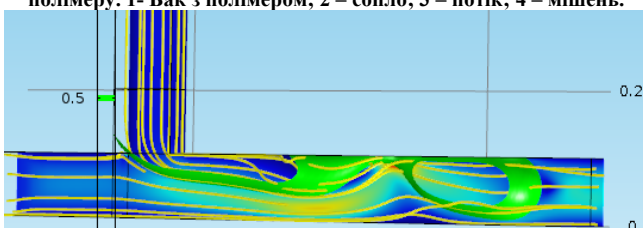


Рисунок 3. Потік повітря.

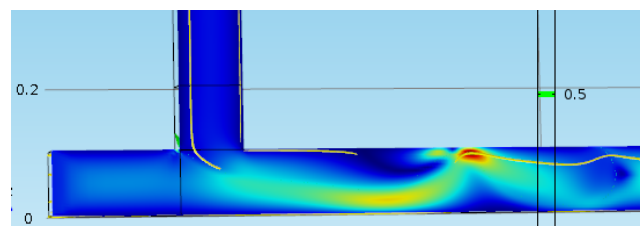


Рисунок 4. Розподіл напружень в краплині полімері.

**Висновки**

Отримані значення потоку двофазного середовища, що складається з полімеру та повітря, яке його формує в краплини. Визначені геометричні характеристики крапель полімеру, що розпилюється при певних значеннях тиску пивітря.

**Література**

1. Горященко С.Л. Аналіз обладнання для нанесення полімерного покриття на текстильні матеріали / С.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – №2 (223). – С. 37-40
2. Spread coating processes, R. A. Park, in *Plastisols and Organosols*, H. A. Sarvetnick, Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1972, pp. 143–181.
3. W. R. Hoffman, *Journal of Coated Fabrics*, vol. 23, Oct., 1993, pp. 124–130.
4. Coated fabrics, B. Dutta, in *Rubber Products Manufacturing Technology*, A. K. Bhowmik, M. M. Hall and H. A. Stephens, Eds., Marcel Dekker, New York, 1994.

Рецензія/Peer review : 7.5.2016 р. Надрукована/Printed : 8.6.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф.. Параска Г.Б.

---

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

**Повні вимоги до оформлення рукопису**  
**<http://vestnik.ho.com.ua/rules/>**

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 10 від 28.4.2016 р.

Підп. до друку 28.1.2016 р. Ум.друк.арк. 32,52 Обл.-вид.арк. 30,94  
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.  
Наклад 100, зам. № \_\_\_\_\_

---

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого  
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”  
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63