

УДК 620.179.4

С.Л. ГОРЯЩЕНКО, Е.О. ГОЛІНКА

Хмельницький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПИЛЕННЯ ФОРСУНКАМИ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ГАЗОДИНАМІЧНИМ МЕТОДОМ

*В статті розглядаються методи побудови потоку рідини, що розпилюється форсунками. Проведене математичне моделювання показало залежність потоку полімеру, що має властивості рідини, від тиску та часу розпилення форсунками. Отримані значення дозволяють прогнозувати необхідну кількість полімеру, що буде наноситись на деталі, утворюючи тонкі плівки. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні обладнання для нанесення полімерів.*

*Ключові слова: модель, розпилення.*

S.L. HORIASHCHENKO, E.O. GOLINKA

Khmelnitsky National University

### SIMULATION OF POLYMER MATERIALS SPUTTERING NOZZLES GASDYNAMIC METHOD

*In the article methods for constructing the flow of the liquid spray nozzles is consider. Mathematical modeling showed the dependence of the flow of the polymer having the properties of the liquid, the pressure of time and spray nozzles. These values allow to predict the required number of polymer is applied to the parts forming thin films. The results can be used in the design of equipment for the application of polymers.*

*Keywords: model, sputtering.*

#### Вступ

При формуванні розпилення полімерів виникають певні питання пов'язані з формуванням в рідкій фазі додаткових внутрішніх пружних напружень на стадії утворення розтягнення багато молекулярних частин при швидкоплинному процесі. Найбільш загальною математичною моделлю для опису течії суцільної рідини є рівняння Нав'є-Стокса [1]. Не дивлячись на те, що реальні процеси частіше всього протікають з великим числом Рейнольда, можна для математичного опису використати наближення пограничного шару. Модель нестисливої рідини зазвичай використовується для опису течій з числом Маху набагато менше одиниці [1].

Існує два підходу до розрахунків в'язкої нестисливої речовини: методи перетворення змінних завихрення-функція струму ( $\omega - \mathbf{N}$ ) та методи запису початкових рівнянь відносно змінних швидкість-тиск ( $u, v, p$ ). Методи рішення рівнянь Нав'є-Стокса, що записані в двохмірних задачах ( $\omega - \mathbf{N}$ ) дозволяють зменшити кількість невідомих, але для тривимірних течій кількість невідомих збільшується в порівнянні з методами що використовують ( $u, v, p$ ). Методики розрахунку дозвукових течій в змінних ( $u, v, p$ ). На моделі нестисливої рідини основані на думці розбиття за фізичними процесами, однак головною проблемою є урахування тиску. З аналізу відомих систем рівнянь [1] руху рідини стає зрозумілим, що поле тиску миттєво реагує на зміну полів вектору швидкості і масової сили та не залежить від розподілу тиску в попередній момент часу.

Реальна геометрія промислового обладнання та пристроїв вимагає для їх проектування розрахункового методу, що залежить від обраної системи координат, та можливості використання адаптивних сіток. В чисельному моделюванні течії в'язкої нестисливої рідини можна умовно виділити два класу алгоритмів – ітераційні методи рішення нелінійних відмінних рівнянь, що основані на ідеях розщеплення за фізичними процесами, та відмінні схеми апроксимації початкових інтегро-диференціальних рівнянь.

#### 1. Основна частина

При розгляді процесів нагрівання полімерів слід розглянути також і конвекційні процеси, що виникають при нагріванні внаслідок контакту з кільцеподібним нагрівачем. Такі процеси можуть бути як в обладнанні для нанесення клеїв розплавів так і у системах акумуляції тепла з неоднорідним нагрівом. Задача о вільній конвекції між зовнішнім круговим циліндром та внутрішнім стержнем грає важливу роль в розумінні процесів розвитку вільноконвертованого пограничного шару з гострими кромками, а також вплив цих кромки на характеристики тепловіддачі. Особливість вільноконвективних течій є наявність зон стійкої та нестійкої температурної стратифікації. Як відомо в задачах з нестійкою стратифікацією можна очікувати різких змін структури течії, або навіть розгалужень рішень при відносно малих числах Грасгофа. Крім того такі течії є тривимірні, тому нестійкість стратифікації росте разом з числом Грасгофа і суттєво впливає на гідродинаміку та теплообмін.

Велика кількість технологічних процесів побудована на використанні теплообміну в дозвуковому течії рідини. Складність реальної геометрії промислових установок та обладнання вимагають від методу розрахунку незалежності від вибору системи координат.

Розглянемо рух в'язкої нестисливої рідини в області довільної форми. В якості початкових рівнянь

виберемо закони збереження, що записані у векторній формі:

$$\iint_S (\mathbf{v}n\rho) dS_w = \mathbf{0}, \quad \iiint_W \frac{d(\rho V)}{dt} dW = \iint_S nP dS_w + \iiint_W G dW,$$

де  $W$  – контрольний об’єм,  $S_w$ –поверхня  $W$ ,  $n$  - зовнішня нормаль до  $S$ ,  $V$ – вектор швидкості,  $\rho$  – густина,  $P$ – Тензор напружень,  $G$  – вектор масових сил.

Інтегральна векторна форма запису початкових рівнянь в вигляді узагальненого закону збереження фізичної величини  $\Phi$  в контрольному об’ємі :

$$\iiint_W \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} dW + \iint_S \left[ \mathbf{v}n(\rho \Phi) - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right] dS_w = \iiint_W S_w dW. \quad (1)$$

Для реалізації чисельних методів часто використовують узагальнене рівняння переносу в диференційній формі. Згідно узагальненої гіпотезі Ньютона запишемо:

$$\mathbf{P} = 2\mu \left( \mathbf{s} - \frac{1}{3} \text{div} \mathbf{V} \right) - p \mathbf{I}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт в’язкості,  $\mathbf{I}$  – одиничний тензор,  $p$  – тиск,  $S$ –тензор швидкості деформацій.  $\text{div} \mathbf{V} = \mathbf{0}$  в нестисливої рідині. Тому тензор швидкості деформацій :

$$\mathbf{s} = \text{def} \mathbf{V} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{V}) + (\nabla \mathbf{V})^T]. \quad (3)$$

Використовуючи формулу Остроградського-Гауса, та перетворення (5) отримаємо після коваріантного диференціювання вираз:

$$\iiint_W \frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} dW + \iint_S \left[ \mathbf{v}n(\rho \mathbf{V}) - \mu \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial n} \right) \right] dS = - \iiint_W \mathbf{v} \rho dW + \iiint_W \mathbf{G} dW. \quad (4)$$

В інтенсивному русі полімерні частини переорієнтовуються відповідно до руху потоку і їх гідродинамічна дія веде до утворення опору загальної течії. Розроблена модель, що описує деформацію макромолекул в інтенсивному потоці з розвитком пружних напружень в рідині:

$$\begin{aligned} \sigma &= -p\mathbf{I} + 2\mu\mathbf{E} + G(\mathbf{A} - \mathbf{I}), \\ \frac{d\mathbf{A}}{dt} &= \mathbf{A}\nabla\mathbf{V} + \nabla\mathbf{V}^T\mathbf{A} - \frac{1}{\Gamma(\mathbf{A} - \mathbf{I})} \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\sigma$  – тензор напружень,  $p$  – тиск,  $G$ - модуль пружності,  $\mathbf{A}$  – тензор пружних деформацій,  $\mathbf{I}$  - одиничний тензор,  $t$  – час,  $\Gamma$  – час релаксації,  $\nabla\mathbf{V}$  – градієнт швидкості.

З урахуванням температурних режимів отримаємо рівняння потоку:

$$U_p(t, \theta) = \left\{ 4E \left[ \frac{\sigma}{r_\theta} \right]^{1/2} - \left[ \frac{\sigma}{r_\theta} \right]^6 + \frac{1}{4} \right\}. \quad (6)$$

де  $r_\theta = \mu \left( \frac{dV_i}{dr_j} + \frac{dV_j}{dr_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{dV_k}{dr_\theta} \cdot \delta_{ij}$  – тензор напружень в полімері в двох координатах (i, j).  $r_\theta$  – тензор температурного поля.

## 2. Моделювання

Математичне моделювання цього процесу показує (Рис.1), що при температурах полімери в факелі розпилення від 160-180°C, та падіння тиску до 0,8 МПа формування факелу супроводжується певними явищами. Однак потік рідини, що виходить з сопла розпилювача не втрачає своєї форми. Це обумовлено тим, що полімерні частинки взаємодіють між собою утворюючи нерозривний потік.

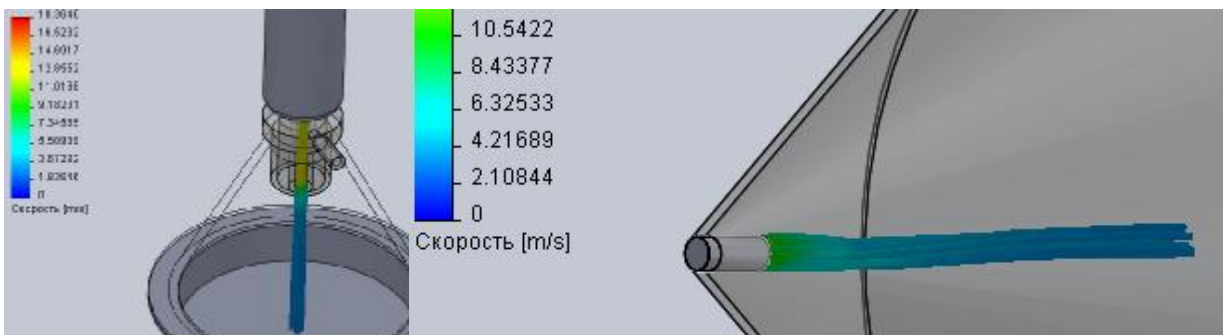


Рис. 1. Моделювання потоку рідини для різних типів форсунок

Дане моделювання дозволяє планувати кількість полімеру, що необхідно для утворення певного шару покриття на деталях. Використовуючи порційне нанесення можна добитись утворення тонких плівок. Кількість полімеру, що наноситься в залежності від часу та тиску показано на рис.2

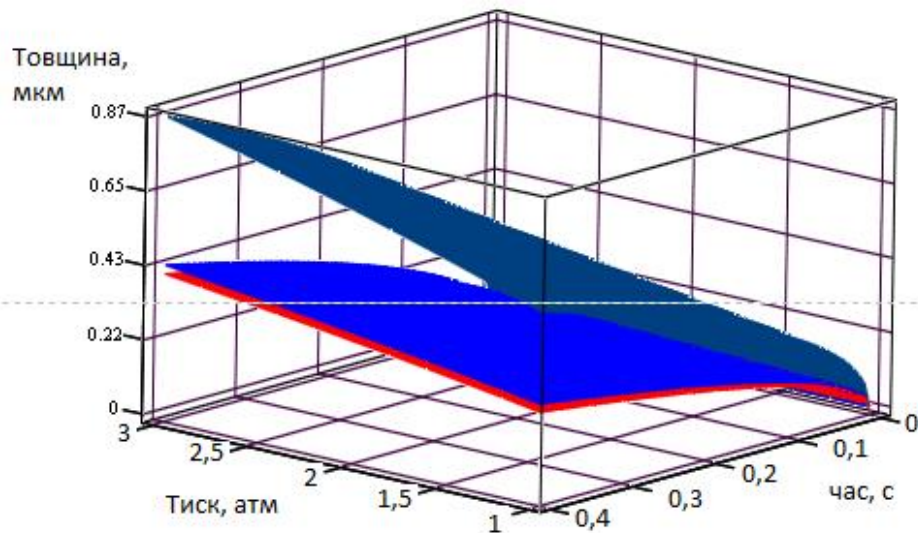


Рис.2. Залежність товщини нанесеного покриття полімеру від тиску в форсуниці та часу розпилювання полімеру.

### Висновки

Проведене математичне моделювання показало залежність потоку полімеру, що має властивості рідини, від тиску та часу розпилення форсунками. Отримані значення дозволяють прогнозувати необхідну кількість полімеру, що буде наноситись на деталі, утворюючи тонкі плівки. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні обладнання для нанесення полімерів.

### Література

1. Пажи Д.Г. Основы техники распыления жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: “Химия”, 1984 – 231 с.
2. Пат. України № 61230. Горященко С.Л., Параска Г.Б., Березненко М.В., Петегерич С.В. "Пристрій для нанесення клею-розплаву на поверхню деталей". 2012, Бюл №3.
3. Горященко С.Л.,. Експериментальні дослідження установки нанесення полімерних матеріалів на штучну шкіру / С.Л. Горященко, С.В. Петегерич, Г.Б. Параска, В.П. Місяць // Вісник КНУТД, 2012 - С. 176-180.
4. S. Horyashchenko. Modeling and reserch of polymer coating on clothing materials./ S. Horyashchenko, G. Paraska, S. Petegerych. // Innovation in textile materials&protective clothing. Monograph, Warsaw, 2012, p.151-159.

### Reference

1. D.G. Pazhi, V.S. Galustov "Osnovytehniki raspylenijazhidkosteij" Moscow. "Himija", 1984 231 p.
2. Gorjashhenko S.L., Paraska G.B., Bereznenko M.V., Petegerich S.V. "Pristrijdijananesennja kleju-rozplavunapoverhjudetalej". Patent № 61230, 2012, Bjul №3.
3. S.L. Gorjashhenko, Eksperimental'nidoslidzhennjaustanovkinanesennjapolimernihmaterialivnashtchnushkiry/ S.V. Petegerich, G.B. Paraska, V.P.Misjac// Visnik KNUVD, 2012, p. 176-180.
4. S. HoryashchenkoModelingandreserchopolymercoatingonclothingmaterials./ S. Horyashchenko, G. Paraska, S. Petegerych. // Innovationintextilematerials&protectiveclothing. Monograph, Warsaw, 2012, p.151-159.

Рецензія/Peer review : 25.5.2014 p.

Надрукована/Printed :25.6.2014 p.