

## Моделювання струменя повітряно-водяної суміші в пакувальних технологіях

*А.М. Масляно, Л.О. Кривопляс-Володіна, к.т.н., О.М. Гавва, д.т.н., НУХТ, м. Київ*

Проведення коректних розрахунків вихлопного струменя систем із сопловими пристроями потрібно починати з визначення значної кількості вихідних даних, які незавжди є постійними величинами. У прикладних дослідженнях точне визначення вихідних даних становить серйозну проблему, при цьому типовим є випадок, коли є значна невизначеність щодо низки вихідних параметрів і констант. У цьому разі складні моделі можна замінити простішими методами розрахунку плинності вихлопного струменя, які враховують всі фізичні фактори. Проведені дослідження присвячені фізичному і комп'ютерному моделюванню для визначення параметрів надзвукових струменів. Методику розроблено на основі спрощених моделей фізико-хімічних процесів вихлопу струменя повітряно-водяної суміші. Виконано опис синтезу результатів розрахунку для різних вхідних даних.

Вхідними параметрами дослідних моделей було обрано: параметри дослідного повітряного потоку (тиск, щільність, температура і швидкість потоку); параметри струменя у вихідному перерізі сопла: радіус вихідного перерізу сопла, тиск, температура газу і частинок, швидкість газу і частинок, склад газового потоку, розміри частинок.

Об'єктом дослідження обрано струмінь у вихідному перерізі сопла із використанням відомих, опублікованих у різних наукових виданнях значень і врахуванням таких основних компонентів продуктів повітряної і повітряно-водяної суміші: газові компоненти (O, O<sub>2</sub>, H, H<sub>2</sub>, HO, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO), харчові барвники (бета-каротин (E160a)), які характеризуються як стабільні барвники, які роблять продукт привабливішим і природним. Їх колірний спектр варіює від світло-жовтого до помаранчевого; як жовтий (жовто-помаранчевий) барвник використовують вітамін B2 (рибофлавін) у формі самого вітаміну або його натрієвої солі рибофлавін-5-фосфорної кислоти (E101).

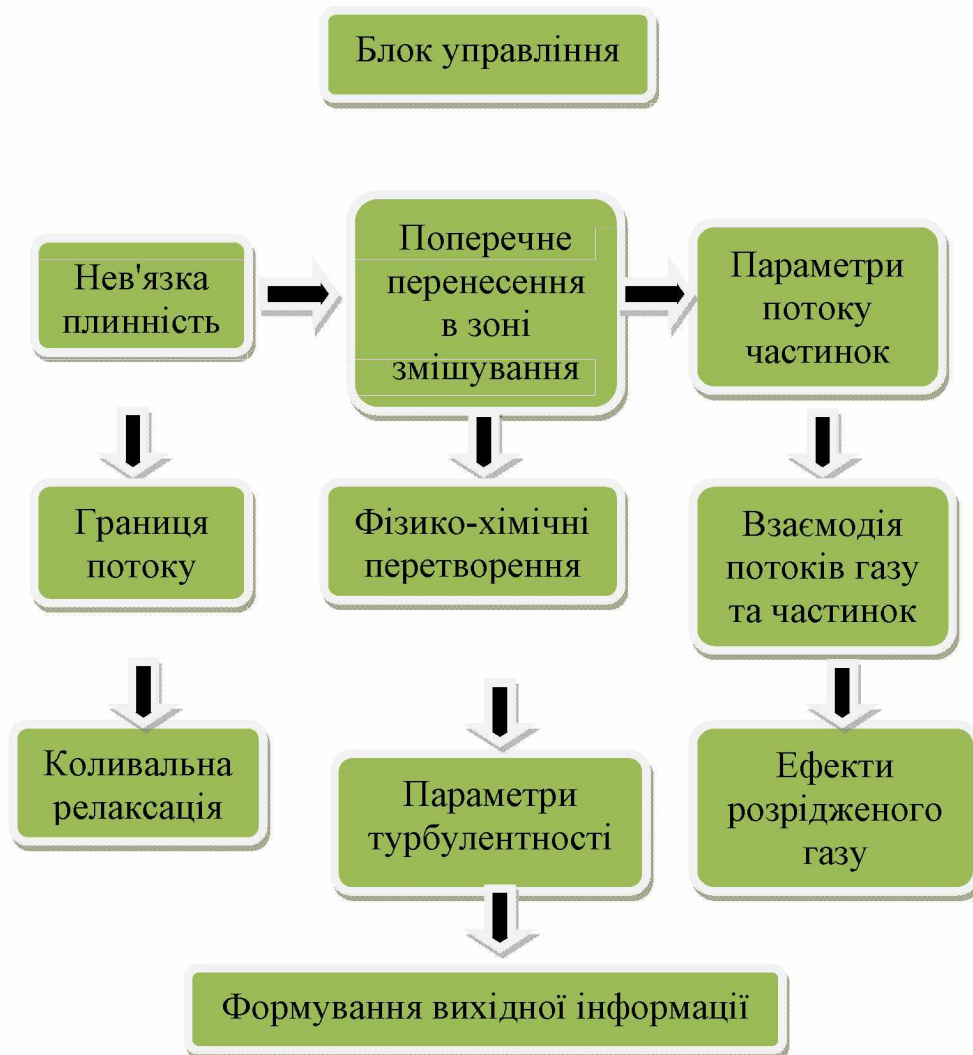
Вихідні дані моделі розподілу в поперечних перерізах струменя:

- тиск, густина, температура, відносні масові концентрації і коливання температури компонента газової фази; об'ємні витрати повітряно-водяної суміші за одиницю часу;
- густина розподілення (напилення) повітряно-водяної суміші і її температура на встановленій обмежувальній відстані від вихідного отвору сопла.

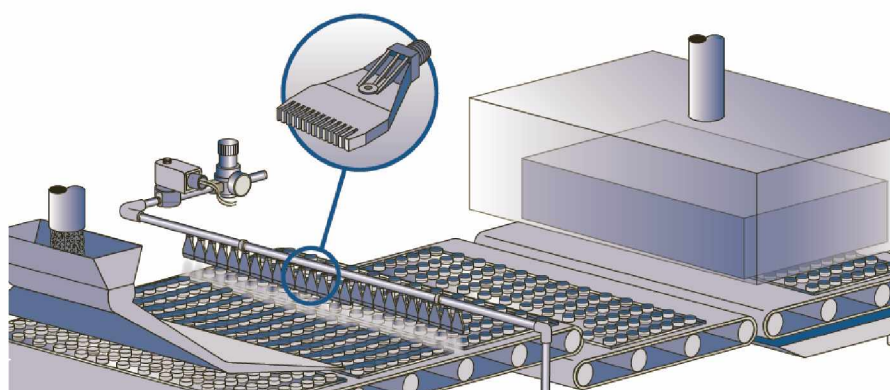
Основні блоки запропонованої комп'ютерної моделі наведено на рис. 1.

Наведемо приклад розрахунку, який базується на чисельному розв'язку системи рівнянь, які описують гетерогенний струмінь (газ + частинки).

Подібні системи (рис. 2), параметри яких було обрано в розрахунку, використовують на ділянках обеззараження споживчої тари, напилення вітамінного шару на продукти, здування залишків продукту перед операціями пакування.



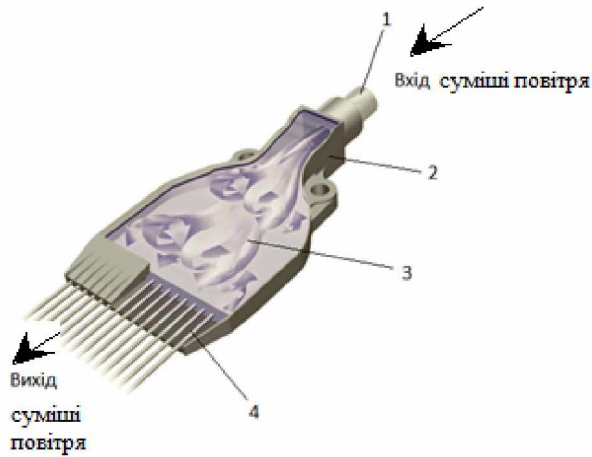
**Рис. 1.** Основні блоки комп'ютерної моделі



**Рис. 2.** Приклад застосування дослідної моделі в технологічному процесі нанесення вітамінного розчину на печиво

Для реалізації цих операцій найефективнішою системою сопла є Windjet Nozzle від виробника IDST [1].

Газогідродинамічна течія розпилюється всередині камери сопла (рис. 3), має різні режими руху: від ламінарного до турбулентного.



**Рис. 3.** Розподілення швидкісного потоку всередині камери сопла: 1 – вхідний отвір; 2 – корпус сопла; 3 – перехід з однопотокового струменя в багатопотоковий; 4 – вихідні отвори

Методика розрахунку [2] дає можливість визначити теоретичну швидкість у горловині сопла, що дорівнює:

$$v = \sqrt{2g \frac{R}{R-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R-1}{R}} \right] \cdot P_1 V_1}$$

де  $P_1$  – абсолютний тиск у тому середовищі, де відбувається вприскування, Па/м<sup>2</sup>;

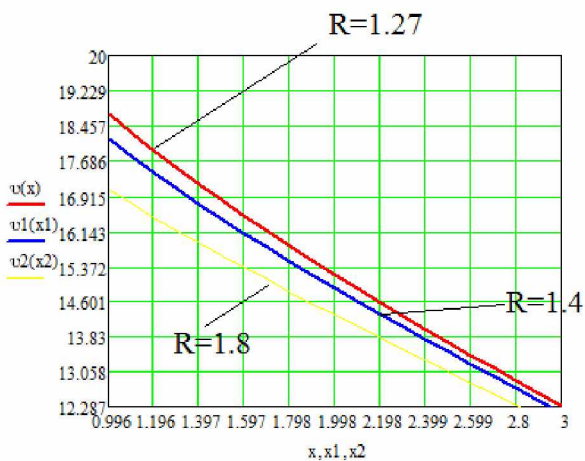
$P_2$  – абсолютний тиск у тому середовищі, куди здійснюється вприскування, Па/м<sup>2</sup>;

$V_1$  – питомий об’єм газу в тому середовищі, де відбувається вприскування, м<sup>3</sup>/кг;

$R$  – показник адиабати, рівний для повітря 1,4; для насиченої водяної пари – 1,135; для перегрітої водяної пари – 1,3;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>.

Припустимо, що  $V_1 = const = 2 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ , тоді  $P_2$  буде змінним – (х).



Використавши програмні обчислення, знайдемо залежність зміни швидкості від зміни тиску  $P_2$ , при цьому використаємо різні адиабатичні сталі  $R$ .

Тиск буде змінюватись за умовою:  $x := 1, 1.1..10$  (рис. 4).

**Рис. 4.** Зміна швидкості потоку від тиску  $P_2$

З рис. 4 виходить, що чим менша адіабатична стала, тим вища швидкість вприскування: у разі збільшення адіабатичної сталої зменшується швидкість потоку.

З умови витрат  $G$  (масових витрат):

$$G = F \sqrt{2g \frac{R}{R-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{R-1}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R+1}{R}} \right] \frac{P_1}{V_1}} \quad [\text{кг/сек}],$$

можна визначити її зміну від  $P_2$ .

Припустимо, що тиск  $P_2$  буде параметром  $x$ , який змінюється:  $x := 1, 1.2.. 10$ , тоді, залежність між витратами  $G$  та тиском  $x$  буде мати вигляд:

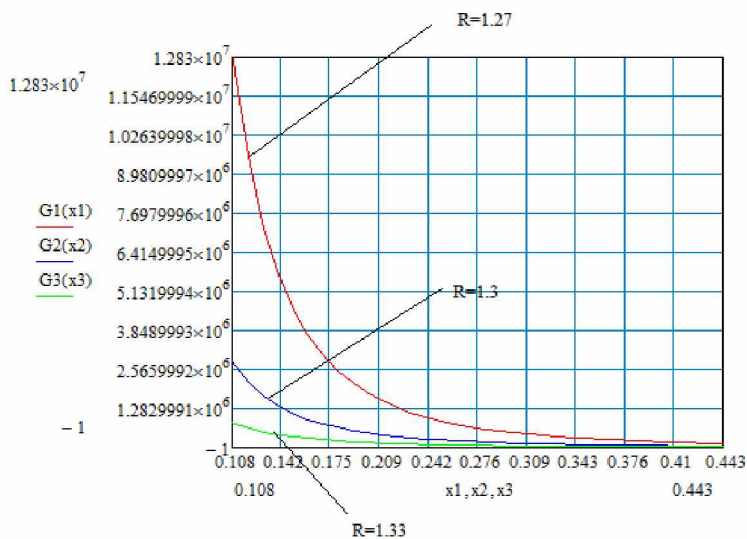


Рис. 5. Зміна витрати суміші повітря від тиску  $P_2$

З рис. 5 можна зробити висновок, що зі збільшенням тиску в середовищі, звідки відбувається вприскування, витрати суміші повітря зменшується.

Аналіз розрахунку форсунок повітряного (чи парового) розприскування високого тиску показав, що при розрахунку форсунок повітряного (чи парового) розприскування високого тиску зазвичай застосовують великі швидкості. Для деяких конструкцій швидкість у місці розпилення доходить до критичної та навіть перевищує її. При розрахунку вихідних перерізів для газу (пари) можна прийняти, що процес усередині форсунки є адіабатичним. Тоді для витікання газів та парів через циліндричні та конусні сопла за умови відношення тисків більше критичного значення:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} > \left( \frac{2}{R+1} \right)^{\frac{R}{R-1}},$$

теоретична швидкість в горловині сопла дорівнює:

$$\vartheta = \sqrt{2g \frac{R}{R-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R-1}{R}} \right] \cdot P_1 V_1}.$$

Теоретичні витрати газу дорівнюють:

$$G = F \sqrt{2g \frac{R}{R-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{R-1}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R+1}{R}} \right] \frac{P_1}{V_1}} \quad [\text{кг/сек}].$$

Якщо відношення тиску рівне критичному або менше за нього, то витікання відбувається за умови відповідної (критичної) швидкості:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} \leq \left( \frac{2}{R+1} \right)^{\frac{R}{R-1}},$$

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{2g \frac{R}{R+1} P_1 V_1}.$$

Теоретичні витрати газу в цьому випадку будуть відповідати:

$$G = f \sqrt{2g \frac{R}{R-1} \left( \frac{2}{R+1} \right)^{\frac{2}{R-1}} \cdot \frac{P_1}{V_1}} \quad [\text{кг/сек}].$$

Критичне відношення  $\varepsilon$  для повітря рівне 0,528; для перегрітої водяної пари – 0,546; для сухої насиченої водяної пари – 0,577 [3].

У практичних розрахунках зручно користуватися рівняннями стану газу (пари). При цьому для випадку адіабатичного процесу ( $S=\text{const}$ ) відношення для швидкості витікання набуває вигляду:

$$v = 91.53 \sqrt{i_1 - i_2} \quad [\text{м/сек}],$$

де  $i_1$  і  $i_2$  – ентальпія газу (пари) в початковому та кінцевому стані відповідно, що визначається за діаграмою  $i$ - $S$  за заданими початковим тиском, температурою і кінцевим тиском.

При цьому за діаграмою визначають питомий об'єм  $V$ , температуру  $t$ , сухість пари  $x$  у кінцевому результаті.

## Висновки

За результатами можна знайти оптимальні залежності між тисками в середовищах, звідки відбувається вприскування та куди. Важливою залежністю є залежність між швидкістю вприскування та витратою речовини. Залежності дають можливість також підбирати необхідні геометричні параметри форсунок та ефективну площу зрошування об'єктів.

## Література

1. *Turns S.R.* An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. – New York: McGraw-Hill International Editions, 2000.
2. *Стулов В.П.* Лекції по газовій динаміці. – М.: Физматлит, 2004.
3. *Луньов В.В.* Перебіг реальних газів з великими швидкостями. – М.: Физматлит, 2007.