

Синтез інтегрованих моделей ежекторів для функціональних модулів пакувальних машин

Л.О. Кривопляс-Володіна, к.т.н., Національний університет харчових технологій, м. Київ

Імітаційні технології дають змогу приймати важливі технічні рішення, прискорюють процеси дослідження й розробки, а також скорочують час виходу нових пакувальних машин на ринок, зберігаючи конкурентну перевагу. Вирішуючи актуальну задачу спрощеного вибору та перевірки регламентованих технологічних операцій з ежекторами в пакувальних машинах, доцільним є розроблення узагальненої моделі для різних робочих середовищ: повітря, вакуум, газомодифіковане середовище (ГМС).

Протягом багатьох років для науково-інженерного персоналу єдиним доступним підходом до моделювання тепло-гідравлічних процесів у пневмогідравлічних системах (ПГС) було застосування емпіричних і напівемпіричних методів розрахунку [1, 2]. Як альтернативу емпіричним і напівемпіричним методам сьогодні розглядають підходи, в основі яких лежить механіка суцільних середовищ, CFD-методи

1; 2 мм. Методами дослідження є чисельні методи у складі CFD-моделі ежектора.

Завданням проведеного дослідження є аналіз можливостей використання пневмосоплових елементів на системах охолодження, знезараження, створення вакууму, введення газових середовищ у споживчу упаковку в технологічних і пакувальних процесах харчових виробництв.

Ежектор складається з активного сопла 1, яке подає робоче середовище до приймальної камери 2 (для підведення потоку ежекції), пасивного сопла 3 для підведення повітря, камери змішування 4, дифузора 5, призначеного для підвищення статичного тиску. В деяких компоновках дифузор або пасивне сопло можуть бути відсутні [6, 7]. Перерізи А, Б, В, Г є основними зонами дослідження тиску p , температури T , швидкості потоку ω , масових витрат G , σ коефіцієнтів відновлення тиску.

Алгоритм дій для якісного виконання чисельних досліджень в системі CFD-моделі ежектора відповідав такій послідовності етапів: постановка завдання дослідження на основі експертного аналізу; вибір методу розрахунку; розроблення фізичної моделі; вибір розрахункового коду; вибір і побудова розрахункової області; розробка комп'ютерної моделі; затвердження результатів чисельного моделювання; верифікація результатів чисельного моделювання; розробка звітної документації.

Зупинимось на описі моделі роботи ежектора детальніше. Робочий процес ежектора у пакувальній машині для оброблення упаковок зводиться до наступного. Високоніпрний (робочий) газ, що має повний тиск p^* і температуру гальмування T^* , підводиться крізь сопло 1 (рис. 2) у змішувальну камеру 4. У вхідному перерізі камери змішувача встановлюється статичний тиск p_2 , який нижчий від повного тиску низьконапірного газу p_2^* ежекції. Під дією різниці тисків низьконапірний газ (повітря) спрямовується в камеру змішування. В кінці камери 4

Введення газомодифікованого середовища

Обробка поверхні споживчої упаковки перед маркуванням

Формування потоку споживчої упаковки



Рис. 1. Приклади використання ежекторів у функціональних соплових пристроях пакувальних машин

(Computational Fluid Dynamics) [3], коли система рівнянь Нав'є-Стокса або Рейнольдса вирішується за допомогою чисельних методів. Відсутність профільної бібліотеки для елементів функціональних модулів пакувальних машин є підставою для створення методології основ проведення CFD-розрахунків з метою їх систематичного застосування при виконанні досліджень, у тому числі для пневмосоплових ежекторів [4].

Матеріалами дослідження є ежектори з L-подібною компоновкою, із сопловим перерізом у межах 0,5; 0,7;

Обґрунтовуючи математичну модель ежектора на принципах гідрогазодинаміки [5, 6], можна спростити методу вибору елементів функціонального модуля пакувальної машини та попередньо оцінити раціональність підібраних параметрів робочого процесу із системами ежекторів (рис. 1). Залежно від призначення ежектори мають різні конструктивні особливості [7]. Найбільш поширена в пакувальних машинах геометрія L-подібного ежектора. Принципову схему дослідного L-подібного ежектора наведено на рис. 2.

після завершення процесу змішування газ має усереднені параметри p_3, T_3, ω_2 . На виході дифузора статичний тиск газу p_4 перевищує статичний тиск у кінці камери змішування p_3 . Якщо позначити масову витрату робочого потоку G_1 , а масові витрати газу ежекції G_2 , то співвідношення $n = G_2 / G_1$ є коефіцієнтом ежекції. При цьому відношення статичного тиску робочого газу перед соплом до статичного тиску газу ежекції p_1 / p_2 буде ступенем розширення. Відношення статичного тиску на виході з дифузора до статичного тиску газу ежекції p_4 / p_2 визначає ступінь стиснення, або ступінь підвищення тиску. При моделюванні в просторі програмного пакета FlowVision основним геометричним параметром ежектора є відношення площин вихідних соплових перетинів для робочого потоку і потоку ежекції:

$$\alpha = \frac{F_1}{F_3} = \frac{F_1}{F_3 - F_1}, \quad (1)$$

де F_1, F_2 – відповідно площа вихідних соплових перерізів для підведення робочого потоку і потоку ежекції; F_3 – площа перетину циліндричної камери змішування (переріз В). Ежектор з великим значенням α вважається високонапірним, але має малий коефіцієнт ежекції. І навпаки, ежектор з малим α дає змогу отримати великий коефіцієнт ежекції, але характеризується малим напором.

Другий геометричний параметр при імітаційному моделюванні ежектора – відносна довжина камери змішування L_1 / d_3 – також впливає на динамічні характеристики ежектора.

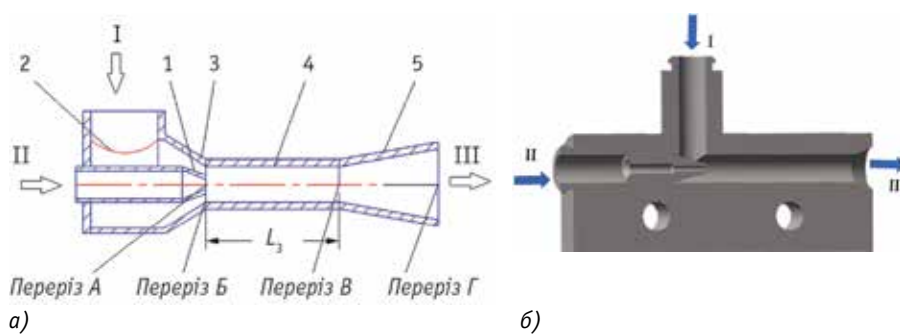


Рис. 2. Загальний вид конструкції L-подібних ежекторів соплових систем у пакувальних лініях: а) класична модель з основними зонами (перерізами) зміни тиску; б) 3D-модель із змінними прохідними перерізами (сопло 0,5; 0,7; 1; 2 мм); I – канал підведення робочого середовища в сопловий переріз; II – вхідний напірний канал; III – вивідний (вихлопний) канал

Третій геометричний параметр моделі ежектора – ступінь розширення дифузора $f = F_4 / F_3$ – є відношенням площі перерізу на виході з дифузора до площини на вході в нього.

Згідно з припущенням дослідної моделі FlowVision, ежектор працює при заданому статичному тиску на виході з дифузора (наприклад, при виході в атмосферу або всередину споживчої упаковки з постійним тиском). Ступінь розширення дифузора f розглядався як параметр, що суттєво впливає на режими роботи ежектора. Для моделювання розроблено чотири 3D-моделі ежектора з різними характеристиками прохідного робочого сопла.

При моделюванні ежектора також зроблено припущення про однорізність потоку. Закон збереження маси має вигляд:

$$G_3 = G_1 + G_2, \text{ тоді} \quad (2)$$

$$G_3 / G_1 = 1 + n.$$

На основі закону збереження енергії можна записати:

$$G_3 \left(c_3 T_3 + \frac{w_3^2}{2} \right) = G_1 \left(c_1 T_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + G_2 \left(c_2 T_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) + Q, \quad (3)$$

де Q – загальна кількість тепла, яке підводиться до повітря (газу) за 1 с через стінку змішувальної камери.

При розрахунках лінійних ежекторів вважають, що $Q = 0$, а змішувані гази однорідні й мають однакову теплоємність.

Витрати повітря (газу) в будь-якому перетині сопла розраховані за формулою [7]:

$$G = m \sigma_1 \frac{p^* F q(\lambda)}{\sqrt{T^*}}, \quad (4)$$

де m знаходиться за формулою і для повітря становить $m = 0,0404 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0,5}$; σ_1 – коефіцієнт відновлення тиску в активному соплі.

Визначення масових витрат у рівнянні нерозривності потоку за допомогою формули (4) дають можливість отримати формулу для зв'язку параметрів ежектора в перерізах ежекції А та В:

$$\frac{p_3^*}{p^*} = \sigma_1 \frac{\sqrt{\left(1 + n \frac{c_2}{c_1}\right) (n+1) \frac{c_2}{c_1}}}{F_3 / F_1 \cdot q(\lambda_3)} q(\lambda_1). \quad (5)$$

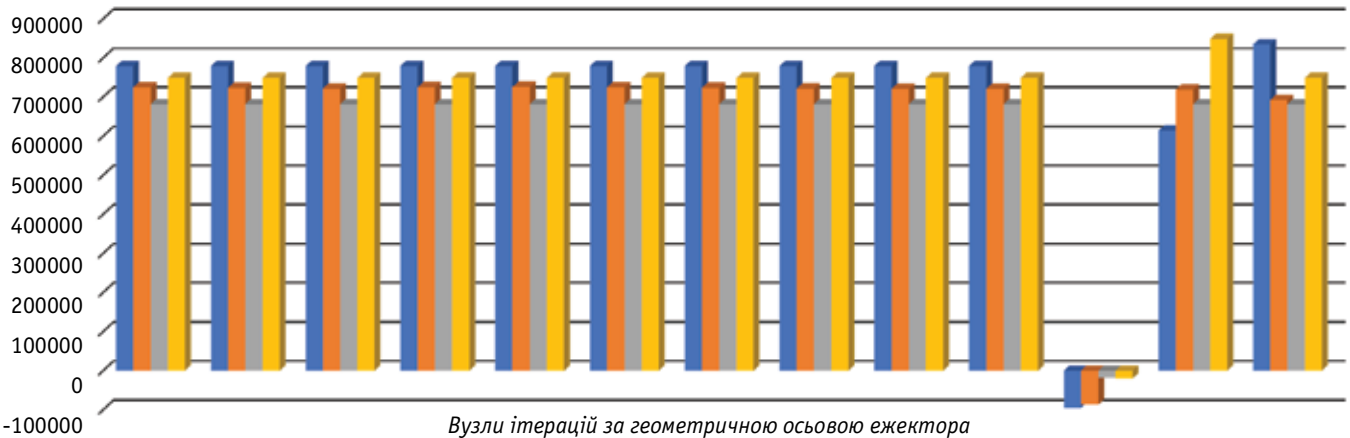
У випадку звукового або надзвукового режимів роботи ежектора приймаємо $q(\lambda_1) = 1$. Рівняння руху робочого середовища має вигляд:

$$G_3 \omega_3 + p_3 F_3 = G_1 \omega_1 + p_1 F_1 + G_2 \omega_2 + p_2 F_2 - P_{mp}. \quad (6)$$

де $G \omega + pF$ – повний імпульс у відповідному перерізі; P_{mp} – сумарна сила



Тиск в ежекторі, P (Па)



	40	45	50	55	60	65	70	75	80	100	200	280	400
■ сопло 0,5	779290	779290	779290	779290	779290	779290	779290	779290	779290	779290	-95000	613970	834340
■ сопло 0,7	724231	722953	721319	724442	724899	724254	723021	721371	720454	720785	-87000	718736	691879
■ сопло 1	681615	681610	681607	681603	681596	681592	681592	681575	681575	681603	-18189,7	681600	681608
■ сопло 2	748591	748575	748559	748543	748526	748514	748510	748503	748509	748582	-19957	848514	748614

Рис. 3. Узагальнені витратні характеристики й характеристики зміни тиску в системі L-подібного ежектора у різних відрізках перерізу B

тертя по бічній поверхні змішувальної камери. Часто приймають $P_{mp} = 0$. Інакше силу тертя можна визначити за формулою [8]:

$$P_{mp} = \zeta \frac{L_3}{d_3} \frac{p_3 \omega_3^2}{2} F_3, \quad (7)$$

де ζ – коефіцієнт опору. Для турбулентного режиму приймаємо, що $\zeta = \text{const}$. Загальне значення $\zeta = 0,015 - 0,02$ [4]. Враховуючи значення приведеної швидкості потоку ежекції [5], отримуємо:

$$P_{mp} = \zeta \frac{L_3}{d_3} G_3 \lambda_3 a_{k_3}, \quad (8)$$

Рівняння імпульсів набуває такого вигляду:

$$\left[z(\lambda_3) + \frac{1}{2} \chi \lambda_3 \right] \sqrt{(n+1)(1+n\Theta)} = z(\lambda_1) + z(\lambda_2) n \sqrt{\Theta}. \quad (9)$$

Тут величина χ – приведена довжина тертя, обумовлена залежністю:

$$\chi = \zeta \frac{L_3}{d_3} \frac{2k}{k+1}. \quad (10)$$

Так як в ежекторах відношення L_3 / d_3 зазвичай не перевищує межу 10 [5], то тертям можна знехтувати й використати формулу:

$$z(\lambda_3) \sqrt{(n+1)(1+n\Theta)} = z(\lambda_1) + z(\lambda_2) n \sqrt{\Theta}. \quad (11)$$

Виразимо коефіцієнт ежекції через відношення витрат за допомогою залежності:

$$n = \frac{G_2}{G_1} = \frac{\sigma_2 p_n^* q(\lambda_2) F_2 \sqrt{T_1^*}}{\sigma_1 p^* q(\lambda_1) F_1 \sqrt{T_2^*}}.$$

Після спрощення отримуємо:

$$n = \frac{p_2^* q(\lambda_2)}{p_1^* q(\lambda_1) \alpha \sqrt{\Theta}}, \quad (12)$$

де σ_2, σ_1 – коефіцієнти відновлення тиску відповідно в активному і пасивному соплі $p_1^* = p^* \sigma_1$ і $p_2^* = p_n^* \sigma_2$.

На основі імітаційного моделювання програмного пакета FlowVision проведено аналіз описаної вище моделі ежектора. Вхідні параметри імітаційної моделі: робоче середовище – повітря ($N_2 + O_2 + Ar + CO_2$); робочий тиск на вхідному перерізі ежектора – 10 бар, температура навколишнього середовища – 293 К, тиск навколишнього середовища -1,013 бар. Отримані в процесі моделювання характеристики зміни тиску вказано на рис. 3.

Висновок

На підставі результатів проведеного циклу імітаційних експериментів можна вважати, що визначальними елементами робочої характеристики ежектора є:

а) сопло, що забезпечує потрібну течію;

б) камера змішування з необхідними параметрами;

в) місце розташування сопла та форма його сполучення з поверхнею ежектора, що забезпечують потрібний розподіл тиску і поворот струменя.

Зазначені фактори визначають рівень витратної характеристики та ефективність роботи низьконапірної ежекторної системи в пакувальній машині. Цей матеріал корисний для розуміння процесу еволюції та поточного стану математичних моделей в ежекторі й виділення ключових аспектів покращення наявних конструкцій ежектуючих пристроїв, які використовуються у функціональних модулях пакувальних машин.

Література

1. A Guide to Improving the Performance of Your Drying and Blow-off Applications with WindJet. // Catalog. U.S.A.: Air Products Publishing, 2014. 20 p.
2. Пажі Д.Г., Галустанов В.С. Распылители жидкости. М. : Химия, 1979. 216 с.
3. Kryvoplyas-Volodina L. Research of dynamic process in the pneumatic cylinder system of double action at the stable movement / Journal of food and packaging science technique and technologies. 2014. Vol. 2. № 4. С. 138–142.

Результати імітаційного моделювання L-подібного ежектора

Діаметр прохідного сопла L-подібного ежектора, мм	Імітаційна модель зміни тиску в перерізі L-подібного ежектора	Узагальнені характеристики моделі зміни тиску і швидкості	Імітаційна модель зміни швидкості в перерізі L-подібного ежектора
0,5			
0,7			
1,0			
2,0			

4. Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications. Nea/CSNI/R. (2007)5. 154 p.
5. Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems. Nea/CSNI/R, (2007)13. 180 p.
6. Extension of CFD Codes Application to Two-Phase Flow Safety Problems (Phase 2). Nea/CSNI/R. (2007)13.
7. Menter F. CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor Safety Applications. European Commission, 5th EURATOM Framework Programme, Report. EVOLECORA-D1, 2002.
8. Oberkampf W. L., Trucano T. G., Hirsch C. Verification, Validation and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics. Applied Mechanics Reviews. 2004. Vol. 57. P. 345–384.

Синтез интегрированных моделей эжекторов для функциональных модулей упаковочных машин
Л.А. Кривопляс-Володина, к.т.н.

Показано применение программы имитационного моделирования и вычислительных ресурсов для решения сложных технических задач и интегрирования передовых технологий в новые технические решения. На базе CFD-методов (Computational Fluid Dynamics) разработаны и исследованы пневмосопловые системы упаковочных машин. Это способствует поиску новых устройств, ускорению процессов исследования и разработки, сокращению времени испытаний, сохранению конкурентных преимуществ. Дано обзор имитационных методов исследования в программном пакете FlowVision; исследована математическая модель гидродинамического характера в L-образном эжекторе для функциональных модулей упаковочных машин пищевых продуктов.
Ключевые слова: эжектор; сопло; упаковки; продукт; режимы; гидродинамика; процесс.

Synthesis of integrated ejector models for functional modules of packaging machines
L. Kryvoplyas-Volodina, PhD

The article shows the application of the simulation program and computing resources for solving complex technical problems and integrating advanced technologies into new technical solutions. Pneumatic nozzle systems for packaging machines are developed and studied on the basis of CFD-methods (Computational Fluid Dynamics). This facilitates the search for new devices, accelerates the research and development processes, shortens the testing time, preserves competitive advantages. The overall goal of this article is to provide an overview of the simulation methods of research in the Flow Vision software package; to study the mathematical model of the hydrodynamic nature in the L-shaped ejector for the functional modules of food packaging machines.

Key words: ejector; nozzle; packaging; product; modes; hydrodynamics; process.