



УДК 621.865.8

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМИННИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ OpenFOAM

Савків В.Б., Проць Я.І., Скочиляс В.В., Федорів П.С.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)

Досліджено залежності присмоктувальної сили та витрати стисненого повітря струминного захоплювального пристрою з плоскою активною поверхнею від діаметра найменшого перерізу заокругленого сопла шляхом числового моделювання у середовищі обчислювальної гідрогазодинаміки OpenFOAM. Встановлено, що виконання заокруглення соплового каналу шляхом звузження з наступним розширенням на вході у радіальний проміжок між активною поверхнею струминного захоплювального пристрою і плоского об'єкта, дозволяє отримати значний (52-56 %) приріст присмоктувальної сили при незначному (6-9 %) зростанні витрати стисненого повітря.

Ключові слова: струминний захоплювальний пристрій, сопло, аеродинамічний ефект, метод скінченних об'ємів.

Вступ. У промисловому виробництві для вирішення завдань автоматизації процесів завантаження і розвантаження технологічного обладнання, міжопераційного транспортування заготовок та упакування готових виробів з використанням промислових роботів широкого розповсюдження набули струминні захоплювальні пристрої (СЗП). Особливістю СЗП є відсутність механічного контакту з поверхнею об'єкта маніпулювання, що важливо при роботі з легкопошкоджуваними, крихкими об'єктами та об'єктами із зовнішніми покриттями.

Аналіз результатів досліджень. Найшвидше такі пристрої знайшли застосування у електроніці при виробництві напівпровідникових пластин [1]. У роботі [2] авторами запропоновано спосіб безконтактного маніпулювання скляними листами при виконанні операцій порізки, шліфування, нагріву, охолодження, гнуття при високих температурах, загартовування скла тощо, за допомогою СЗП. Використання запропонованих пристроїв дозволяє забезпечити відсутність оптичних спотворень та подряпин на поверхні скла чи нанесених на цю поверхню покриттів. Також відомі застосування СЗП у поліграфії при виготовленні та наступному використанні літографічних друкарських форм [3], у харчовій промисловості для маніпулювання нарізаними м'ясними [4] та овочевими [5] пластинками, у текстильній промисловості [6].

Постановка задачі. Оскільки технологічні процеси суттєво різняться, то до функціональних та експлуатаційних характеристик захоплювальних пристроїв ставляться різні вимоги. У проаналізованих роботах не досліджувався вплив конструктивних параметрів СЗП, а саме форми сопла, на величину сили притягання та витрати стисненого повітря. У роботі [2] лише зазначено, що сопло з конічною чи еліптичною поверхнею забезпечить краще входження повітряного потоку в проміжок між поверхнями СЗП та скляного листа, а для зменшення відштовхувальної сили пропонується використовувати відхиляючу вставку у каналі сопла. Тому існує потреба у дослідженні та обґрунтуванні конструктивних параметрів СЗП із метою підвищення їх силових характеристик, зменшення витрати стисненого повітря.

Мета роботи. Провести розрахунково-теоретичне дослідження, що стосується вивчення залежності силових та витратних характеристик струминних захоплювальних пристроїв від конструктивних параметрів цих пристроїв з використанням CAD/CAE технологій.

Основна частина. Поставлена задача вирішується із застосуванням методів обчислювальної гідрогазодинаміки та інформаційних технологій для імітаційного числового моделювання методом скінченних об'ємів (МСО). МСО дозволяє з високою точністю визначати розподіли тиску, швидкостей, отримувати лінії течії та інші параметри потоків.



Відомо, що робочі характеристики струминних захоплювальних пристроїв залежать від параметрів джерела живлення та тих геометричних параметрів захоплювачів, які мають вплив на формування потоку газу. Для СЗП, в якому напрям струменя повітря перпендикулярний до площини об'єкта маніпулювання такими параметрами є радіус сопла r_0 , радіус захоплювача r_2 , висота проміжку між краєм сопла і об'єктом h_0 (рис. 1а).

Для зменшення втрат енергії потоку повітря у проміжку між торцем захоплювача і об'єктом необхідно, щоб поверхня, яка взаємодіє з об'єктом, була гладкою, без будь-яких виступів чи заглибин, що можуть спричинити додаткові втрати енергії потоку.

Потік повітря, що витікає із отвору сопла 1 в проміжок між активною поверхнею СЗП і плоского об'єкта, плавно звужується. При великих значеннях відстані $h_0 > 15$ мм, струмінь повітря діє на об'єкт відштовхувальною силою. При зменшенні відстані між поверхнями СЗП та об'єкта присмоктувальна дія струменя повітря стає переважаючою, порівняно з відштовхувальною силою. Свого максимуму присмоктувальна сила досягає при відстані $h_0 = 0.2..0.5$ мм. Для уникнення бічних зміщень об'єкта у площину власного торця доцільно використовувати бічні упори 3.

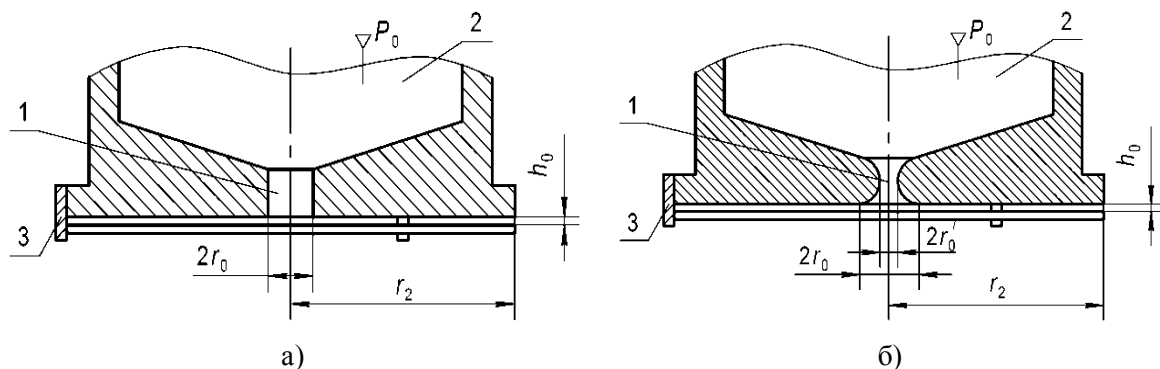


Рисунок 1 – Геометричні параметри струминних захоплювальних пристроїв з плоскою активною поверхнею з циліндричним соплом (а) та заокругленим соплом (б)

Для зменшення величини відштовхувальної сили у момент захоплення об'єкта маніпулювання ($h_0 > 1$ мм) доцільно, щоб потік при проходженні через сопло звужувався з наступним розширенням на вході у радіальний проміжок між активною поверхнею СЗП і плоского об'єкта. Таку геометрію потоку забезпечує конструкція СЗП із заокругленим соплом (рис. 1, б). Діаметр найменшого перерізу сопла визначається з умови, що площа потоку на вході у радіальний проміжок між активною поверхнею СЗП і об'єкта ($S_{вх.}$) повинна бути співвимірною з площею найменшого перерізу сопла ($S_{н.п.с}$) з коефіцієнтом пропорційності n ($n = S_{н.п.с}/S_{вх.}$), тобто:

$$\frac{\pi d_0'^2}{4} = \pi d_0 h_0 \cdot n \Rightarrow d_0' = \sqrt{4n d_0 h_0}. \quad (1)$$

За наявності звукової швидкості на вході потоку у радіальний проміжок аеродинамічний ефект зумовлює утворення зон розрідження між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта. Збільшення площі поперечного перерізу надзвукового потоку призводить до зростання його швидкості з одночасним зменшенням статичного тиску в зазорі. На радіусі $r_{ст}$ надзвуковий потік стрибком переходить у дозвуковий. Унаслідок подальшого розширення швидкість дозвукового потоку спадає, а статичний тиск у проміжку плавно зростає до величини атмосферного p_a .

Математична модель, що описує процес витікання повітря крізь сопло у радіальний проміжок між активною поверхнею захоплювача і плоского об'єкта складається з рівнянь нерозривності, руху, енергії, та рівнянь моделі турбулентності. Процес витікання вважається стаціонарним, масовими силами нехтується.

Рівняння нерозривності матиме вигляд:



$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Рівняння руху представлені рівняннями Нав'є-Стокса динаміки в'язкого газу з використанням осереднення за Рейнольдсом та гіпотези Бусінеска, які мають вигляд [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + T_x; \\ \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) + T_y; \\ \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + T_z, \end{aligned} \quad (3)$$

де ρ – густина газу, V_x, V_y, V_z – проекції вектора швидкості осередненого потоку газу, g_x, g_y, g_z – проекції вектора масових сил, P – надлишковий тиск, μ_e – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, $\mu_e = \mu + \mu_t$, μ – молекулярний коефіцієнт динамічної в'язкості, μ_t – турбулентний (вихровий) коефіцієнт динамічної в'язкості (вираз буде подано нижче), T_x, T_y, T_z – втрати на внутрішнє тертя,

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \right), \\ T_y &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial y} \right), \\ T_z &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Рівняння повної енергії виражене у термінах температури гальмування і для випадку стиснутого газу з врахуванням теплопереносу має наступний вигляд [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x c_p T_0) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V_y c_p T_0) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z c_p T_0) &= \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_e \frac{\partial T_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_e \frac{\partial T_0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_e \frac{\partial T_0}{\partial z} \right) + W^V + E^k + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p}, \quad (6)$$

$$W^V = V_j \mu \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{\partial V_k}{\partial x_j} \right], \quad (7)$$

$$E^k = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} |V^2| \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} |V^2| \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} |V^2| \right) \right], \quad (8)$$

$$\Phi = \mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_k}, \quad (9)$$

де c_p – питома теплоємність газу при сталому тиску, T_0 – температура гальмування,



T – абсолютна температура, V – величина вектора швидкості, κ_e – ефективний коефіцієнт теплопровідності, $\kappa_e = \kappa + \kappa_t$, κ – коефіцієнт теплопровідності, κ_t – турбулентний коефіцієнт теплопровідності, $\kappa_t = (\mu_t c_p) / Pr_t$, $Pr_t = 0,9$, W^V – доданок, що характеризує роботу сил в'язкого тертя, записаний в тензорній формі, E^k – кінетична енергія, Φ – в'язка дисипація.

Для опису турбулентності вибрано, створену Ф. Р. Ментером у 1993 р. [9], модель переносу напружень зсуву (Shear Stress Transport, SST). Двадцятирічний досвід використання цієї моделі свідчить, що за сукупністю своїх якостей SST модель є однією з найкращих серед існуючих RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) моделей турбулентності [10]. SST модель є комбінацією раніше відомих k - ϵ і k - ω моделей та забезпечує сукупність кращих якостей цих моделей. А саме, k - ϵ модель краща для розрахунку вільних і зсувних струминних потоків, а k - ω модель забезпечує значно точніший опис пристінкових граничних шарів [7]. Ф. Р. Ментер об'єднав ці моделі за допомогою емпіричної функції F_1 , яка забезпечує близькість сумарної моделі до k - ϵ моделі на відстані від твердих стінок, і до k - ω моделі в пристінковій частині потоку.

Формулювання SST моделі турбулентності містить два рівняння – для кінетичної енергії турбулентності k і питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ω , які виглядають таким чином [9]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right], \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, \quad (11)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega), \quad (12)$$

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}, \quad (13)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right); \quad S^2 = 2S_{ij}S_{ij}, \quad (14)$$

Емпірична функція F_1 визначається наступним чином:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\}, \quad (15)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right), \quad (16)$$

де y – відстань до найближчої стінки. F_1 дорівнює нулю на відстані від поверхонь (k - ϵ -модель) і змінює своє значення на одиницю всередині граничного шару (k - ω модель).

Друга емпірична функція F_2 визначається так:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]. \quad (17)$$



Емпіричні константи моделі визначаються через відповідні константи k - ε та k - ω моделей за допомогою першої емпіричної функції:

$$\sigma_k = \sigma_{k1}F_1 + \sigma_{k2}(1 - F_1), \quad \sigma_\omega = \sigma_{\omega1}F_1 + \sigma_{\omega2}(1 - F_1),$$

$$\alpha = \alpha_1F_1 + \alpha_2(1 - F_1), \quad \beta = \beta_1F_1 + \beta_2(1 - F_1).$$

Значення інших модельних констант: $\sigma_{k1} = 0.85$, $\sigma_{\omega1} = 0.5$, $\alpha_1 = 5/9$, $\beta_1 = 3/40$, $\beta^* = 0.09$, $\alpha_2 = 0.31$, $\sigma_{k2} = 1$, $\sigma_{\omega2} = 0.856$, $\alpha_2 = 0.44$, $\beta_2 = 0.0828$

Числове моделювання. Розрахунки виконувались у середовищі обчислювальної гідрогазодинаміки з відкритим вихідним кодом OpenFOAM (OpenCFD) [11].

Для визначення оптимального діаметра найменшого перерізу сопла проведено моделювання з такими геометричними параметрами: зовнішній діаметр СЗП $d_2 = 60$ мм, діаметр сопла $d_0 = 6$ мм, діаметр найменшого перерізу сопла $d'_0 = 2,245; 2,298; 2,4; 2,498; 2,592; 2,683; 6$ мм, висота радіального проміжку $h_0 = 0,2$ мм. Діаметр d'_0 вибирався таким чином, щоб площа потоку на вході в радіальний проміжок була на 5, 10, 20, 30, 40, 50 % більшою від площі найменшого перерізу сопла.

Розрахункова сітка скінченних елементів наведена на рис. 2. В якості матеріалу використано повітря як ідеальний газ з бібліотек програми ($c_p=1,0044$ кДж/(кг·К) =const; $M=28,96$ кг/кмоль⁻¹; $\mu=18,31$ мкПа/с; $\kappa=0,0261$ Вт/(м·К) при $T=298$ К).

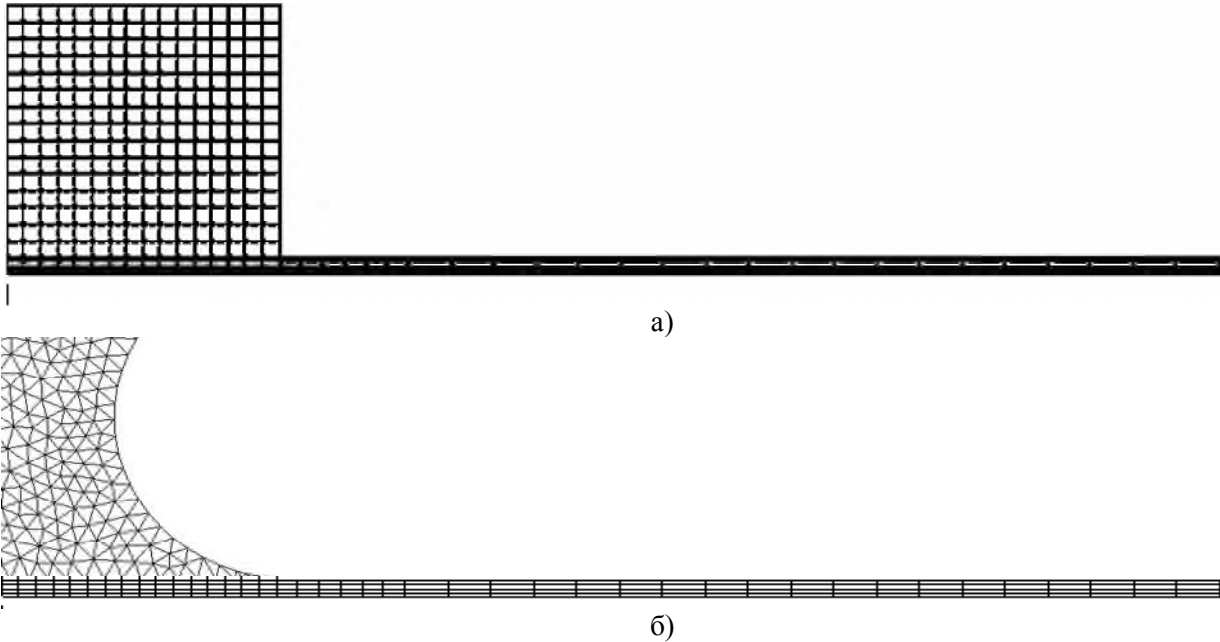


Рисунок 2 – Розрахункова сітка повітряного потоку у струминному захоплювальному пристрої з плоскою активною поверхнею з прямим соплом (а) та заокругленим соплом (б)

Граничні умови прийняли наступні (рис. 3): тиск живлення на вході $P_n=100..400$ кПа; тиск на виході з радіального проміжку вважали атмосферним $P_n=0$ кПа; параметр турбулентності для k та $\omega - I = 5\%$; стінки вважали гладкими (smooth wall) без проковзування (no-slip wall); процес витікання – ізотермічний, $T=287$ К.

Результати дослідження. За результатами виконаних розрахунків з використанням розв'язувального модуля для близьких до звукових та надзвукових турбулентних потоків стисливих газів *sonicTurbFoam* були побудовані розподіли тиску, швидкостей та лінії течії.

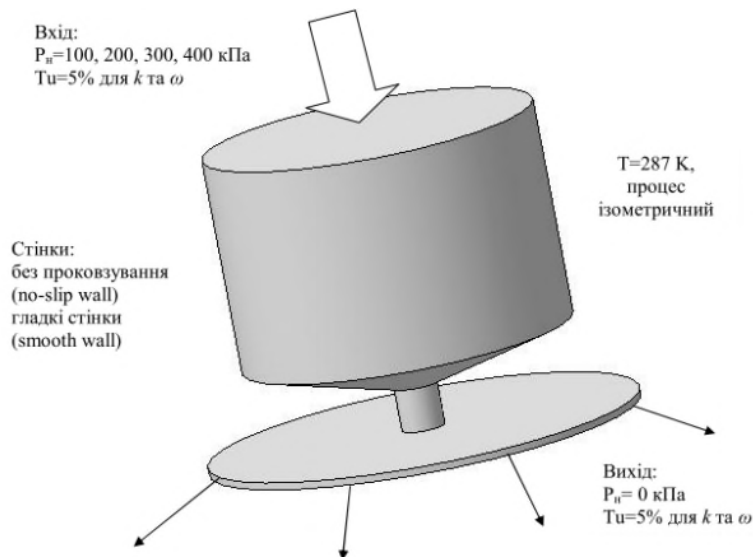


Рисунок 3 – Граничні умови для моделі потоку повітря у СЗП із плоскою активною поверхнею

Для кількісної оцінки величини присмоктувальної сили СЗП із різними параметрами, чисельно проінтегрували отримані при розрахунку табличні дані розподілів тиску повітря в проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта за допомогою методу трапецій:

$$F = \sum_k \frac{P_{k-1} + P_k}{2} \cdot \pi \left((k\Delta r)^2 - ((k-1)\Delta r)^2 \right), \quad (18)$$

де P_k – значення тиску на k -ому інтервалі інтегрування; Δr – довжина інтервалу інтегрування, $\Delta r = 3,03 \cdot 10^{-4}$ м.

Для аналізу ефективності струминних захоплювачів в статичному режимі, коли об'єкт маніпулювання вже захоплений і займає фіксоване положення відносно захоплювального пристрою доцільно використовувати показник ефективності K_{ef} [Н/Вт], що характеризує відношення величини присмоктувальної сили F до затрачуваної потужності P_3 .

$$K_{ef} = \frac{F}{P_3} = \frac{\rho_a F}{\rho_0 G_0}, \quad (19)$$

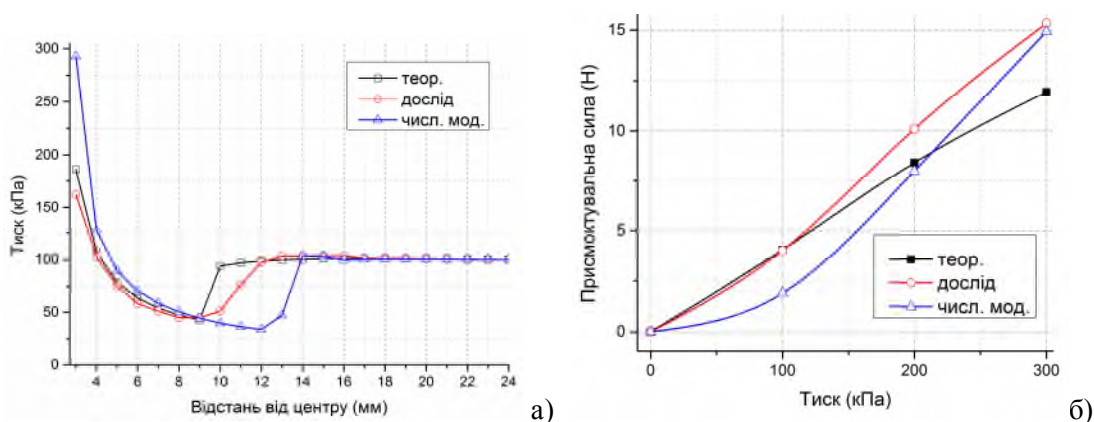


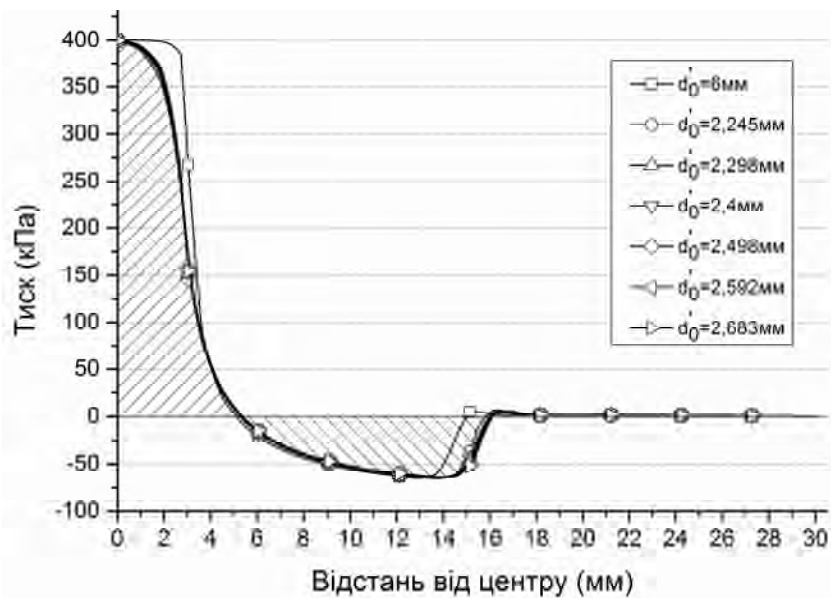
Рисунок 4 – Графіки розподілу тиску повітря в проміжку між взаємодіючими поверхнями СЗП та об'єкта при надлишковому тиску живлення $p_{0н} = 300$ кПа (а) та силові характеристики (б) СЗП із плоскою активною поверхнею та циліндричним соплом

Для перевірки, отриманих при чисельному розрахунку, результатів виконали порівняння з теоретичними розрахунками та дослідом наведеними у [12]. Як видно з

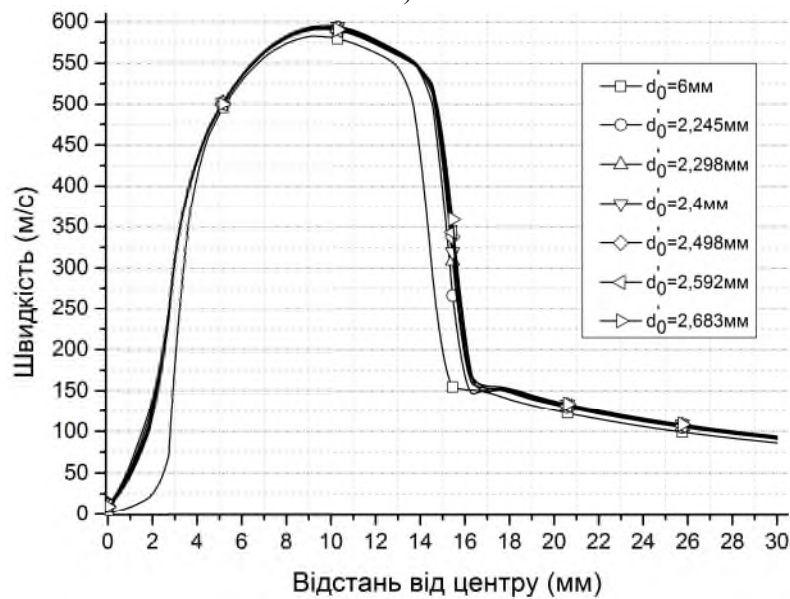


рис. 4, результати отримані при числовому моделюванні узгоджуються з результатами, отриманими при теоретичних розрахунках та дослідним шляхом.

Як видно з рис. 5а площа під кривою розподілу тиску з додатними значеннями буде меншою для конструкцій із заокругленим соплом, ніж у конструкції з прямим соплом. А це означає, що відштовхувальна сила струменя буде меншою для захоплювачів із заокругленим соплом. Також з розподілів тиску та швидкості видно, що радіус стрибка $r_{ст}$ надзвукового режиму руху потоку в дозвуковий для конструкцій захоплювачів із заокругленим соплом буде розміщуватись ближче до краю захоплювача, а отже зона розрідження буде ширшою (площа над кривою розподілу тиску з від'ємними значеннями буде більшою). Це свідчить про значнішу присмоктувальну силу струменя повітря у захоплювачах із заокругленим соплом. Швидкість повітря у конструкції із заокругленим соплом переходить у надзвуковий режим на меншому радіусі та досягає більшого максимуму, що пов'язано із зменшенням втрат енергії потоку, і в результаті підвищується аеродинамічний ефект.



а)



б)

Рисунок 5 – Графіки розподілів тиску повітря (а) та швидкості повітря (б) в проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта для захоплювачів з плоскою активною поверхнею при надлишковому тиску живлення $p_{0н} = 400\text{кПа}$

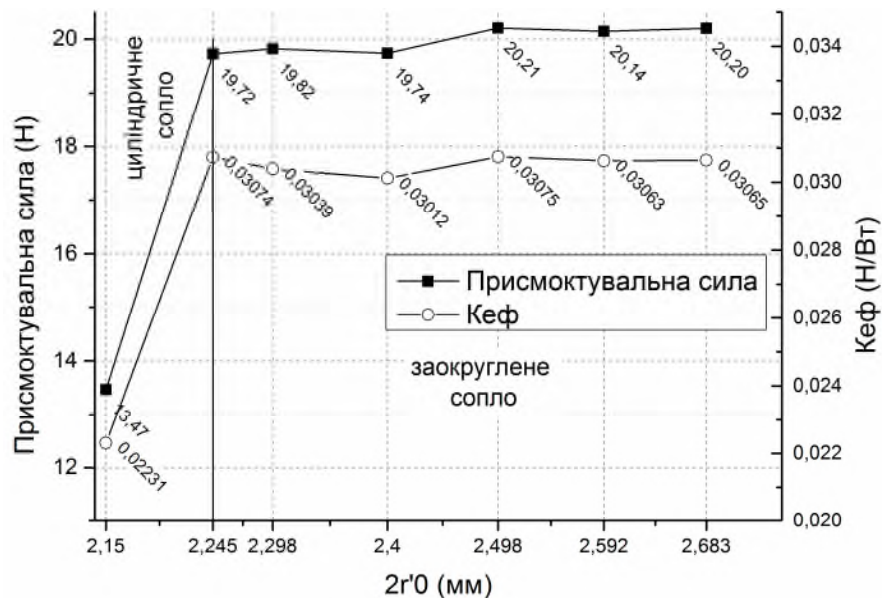


Рисунок 6 – Графіки присмоктувальної сили та показника ефективності для захоплювачів з плоскою активною поверхнею при надлишковому тиску живлення $p_{0н} = 400\text{кПа}$

Таблиця 1 – Силві та витратні характеристики СЗП із прямим та заокругленим соплом

Найменший діаметр сопла $2r'_0$, мм	6	2,245	2,298	2,4	2,498	2,592	2,683
ΔS , %	-	5	10	20	30	40	50
Сила F , Н	13,61	19,72	19,82	19,74	20,21	20,14	20,20
ΔF , %	-	52,81	53,54	52,91	56,39	55,94	56,34
G_0 , г/с	1,8318	1,9474	1,9791	1,98855	1,99421	1,99584	2,00015
ΔG_0 , %	-	6,31	8,04	8,56	8,87	8,96	9,19
$K_{еф}$, Н/Вт	0,02231	0,03074	0,03039	0,03012	0,03075	0,03063	0,03065

Аналіз отриманих характеристик (рис. 6, табл. 1) дозволяє встановити необхідний переріз сопла, що забезпечує максимальний приріст присмоктувальної сили при допустимому зростанні витрати стисненого повітря. Показник ефективності у цьому випадку буде найбільшим.

На рис. 7 зображено силві характеристики для СЗП із циліндричним соплом та із заокругленим соплом, з яких видно, що значення присмоктувальної сили для конструкції із заокругленим соплом є більшими на усьому діапазоні тисків живлення.

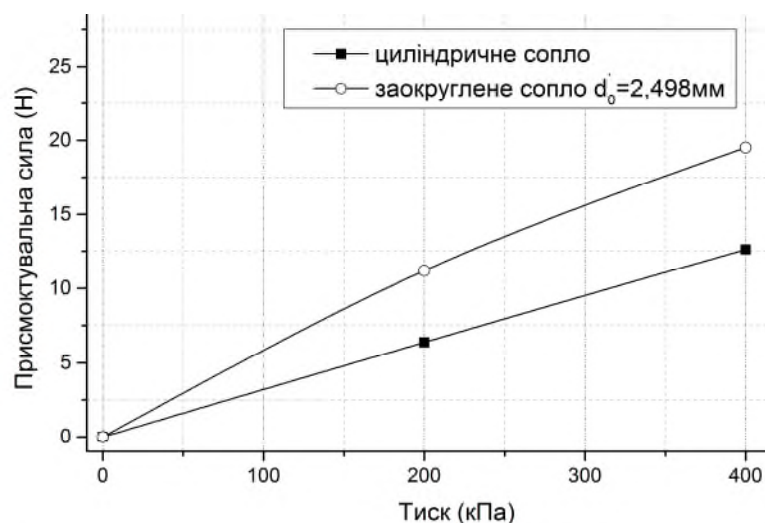


Рисунок 7 – Силві характеристики СЗП із циліндричним соплом та заокругленим соплом з найменшим діаметром сопла 2,498 мм



Висновки. Установлено залежності присмоктувальної сили та витрати стисненого повітря струминного захоплювального пристрою з плоскою активною поверхнею від діаметра найменшого перерізу сопла шляхом числового моделювання у середовищі обчислювальної гідрогазодинаміки з відкритим вихідним кодом OpenFOAM. На основі досліджень встановлено, що доцільно вибирати радіус заокруглення сопла струминного захоплювального пристрою таким чином, щоб це заокруглення забезпечувало збільшення площі потоку на вході в радіальний проміжок між поверхнею захоплювача та об'єкта маніпулювання на 30 %. У цьому випадку приріст присмоктувальної сили становить 56,4 % при зростанні витрати стисненого повітря на 8,9 %. Наступні дослідження у цьому напрямку дозволять встановити закономірності, які дозволять проектувати струминні захоплювальні пристрої з оптимальними силовими та витратними характеристиками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pat. 4029351 United States : Int. Cl.⁷: B66C 1/02. Bernoulli Pickup head with self-restoring anti-tilt improvement / Donald Harlem Apgar, Richard Fleming Kilburn ; Assignee : International Business Machines Corporation, Armonk, N. Y. – Appl. No. : 692068 ; filed 02.06.1976; date of patent 14.06.1977.
2. Pat. 4921520 United States : Int. Cl.⁷: C03B 25/035. Process for applying forces to glass sheets, in particular at a high temperature / Giovanni M. Carlomagno (Italy). – Appl. No. : 149400 ; filed 28.01.1988; date of patent 01.05.1990 ; priority 03.02.1987, № 40404 A/87 (Italy).
3. pat. 6601888 United States : Int. Cl.⁷: B25J 15/06. Contactless handling of objects / Lon McIlwraith, Andrew Christie ; Assignee : Creo Inc., Burnaby (CA) – Appl. No.: 09/810408 ; filed 19.03.2001; date of patent 05.08.2003 ; priority 19.09.2002, US 2002/0130524 A1.
4. Erzincanli F. Design and Operational Considerations of a Non-contact Robotic Handling System for Non-rigid materials / F. Erzincanli, J. M. Sharp, S. Erhal // Int. J. Mach. Tools and Manufacture – 1998. – Vol. 38, № 4, – P. 353-361.
5. Davis S. An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables / S. Davis, J. O. Gray, Darwin G. Caldwell // Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing – 2008. – Vol. 24, № 2, – P. 249-257.
6. Ozelik B. A non-contact end-effector for the handling of garments / B. Ozelik, F. Erzincanli // Robotica – 2002. – Vol. 20, № 4, – P. 447-450.
7. Гарбарук А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учебное пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
8. Шабаров В. В. Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач : учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» / В. В. Шабаров. – Нижний Новгород, 2006. – 108 с.
9. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F. R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, № 8. – P. 1598-1605.
10. Menter F. R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 ; ed : K. Hanjalic, Y. Nagano, M. J. Tummers – Begell House, Inc., 2003. – P. 625-632.
11. OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox: User Guide. Version 2.2.0 / Electronic edition, 2013-02-22. – OpenFOAM Foundation, 2013. – 211 p.
12. Савків В. Б. Оптимізація форми активної поверхні струменевих захоплювальних пристроїв промислових роботів / В. Б. Савків, Я. І. Проць, О. М. Фендьо, Г. В. Савків // Вісник ТДТУ. Сер. «Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки». – Тернопіль : Видавництво ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2010. – № 1. – С. 73-80.



Савкив В.Б., Проць Я.И., Скочиляс В.В., Федорив П.С. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ OPENFOAM

Исследованы зависимости присасывающей силы и расхода сжатого воздуха струйного захватывающего устройства с плоской активной поверхностью от диаметра наименьшего сечения сопла путем численного моделирования в среде вычислительной гидрогазодинамики OpenFOAM. Установлено, что выполнение закругления соплового канала путем сужения с расширением на входе в радиальный зазор между активной поверхностью струйного захватывающего устройства и плоского объекта, позволяет получить значительный (52-56 %) прирост присасывающей силы при незначительном (6-9 %) росте расхода сжатого воздуха.

Ключевые слова: струйное захватывающее устройство, сопло, аэродинамический эффект, метод конечных объемов.

Savkiv V.B., Prots Y.I., Skochylyas V.V., Fedoriv P.S. FORCE CHARACTERISTICS INVESTIGATION OF AIR-JET GRIPPING DEVICES BY NUMERICAL SIMULATION IN OPENFOAM SOFTWARE

The gripping force dependencies and compressed air consumption dependencies from the diameter of the smallest rounded nozzle section of air-jet gripping device with a flat active surface were investigated by numerical simulation using open source computational fluid dynamics (CFD) software OpenFOAM. Established that making rounded nozzle channel with constriction and extension of it at the entrance to the radial gap between the active surface of the air-jet gripping device and a flat object, provides a significant (52-56%) increase of gripping force with a slight (6-9%) increase in consumption of compressed air.

Keywords: air-jet gripping device, nozzle, aerodynamic effect, the finite volumes method.

Статтю прийнято
до редакції 24.10.2013