

УДК 621.865.8

В.Савків, канд.техн.наук; О.Фендьо; Г.Савків

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ СТРУМЕНЕВИХ ЕЖЕКЦІЙНИХ ЗАХОПЛЮВАЧІВ АВТОМАТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАВАНТАЖЕННЯ

***Резюме.** Проаналізовано динаміку й умови протікання газового потоку в кільцевому соплі та в проміжку між взаємодіючими поверхнями струменевого захоплювального пристрою й об'єкта маніпулювання. Запропоновано методи підвищення підйімальної здатності даних пристроїв. Виведено рівняння для визначення розподілу тиску в проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта маніпулювання, формули для розрахунку силових характеристик. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень струменевих ежекційних захоплювачів з різною формою активної поверхні.*

***Ключові слова:** автоматизація, струменевий захоплювальний пристрій, об'єкт маніпулювання, струмінь повітря, кільцеве сопло.*

V.Savkiv, O.Fendyo, G.Savkiv

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

IMPROVEMENT OF CONSTRUCTION OF STREAMS CAPTURES OF AUTOMATIC DEVICES OF LOAD

***The summary.** A dynamics and terms of flowing of gas stream is analysed in a circular nozzle and in an interval between the interactive surfaces of stream gripper will build on and object of manipulation. The methods of increase of lifting ability of information of devices are offered. Equalization is shown out for determination of division of pressure in an interval between the interactive surfaces of invader and object of manipulation, formula for the calculation of power descriptions. The results of theoretical and experimental researches of ежекційних invaders of streams are resulted with the different form of active surface.*

***Key words:** automation, stream gripper device, object of manipulation, stream of air, circular nozzle.*

Постановка проблеми. При розв'язанні проблем автоматизації завантаження та розвантаження оброблюваних деталей на окремих верстатах і автоматичних лініях набувають широкого застосування струменеві захоплювальні пристрої [1]. Вони відрізняються високою надійністю та довговічністю роботи, низькою собівартістю виготовлення, можливістю безконтактного захоплення та утримування в процесі маніпулювання заготовок і деталей незалежно від їх матеріалу, механічних характеристик, структури поверхневого шару та температури.

Аналіз результатів досліджень. Захоплювачі автоматичних механізмів, побудовані на базі струменевої техніки, володіють низькою переваг. Однак у цьому напрямку немає детальних теоретичних і експериментальних досліджень, які б дозволили створити конструкції захоплювачів більшої вантажопідйімальності, надійності в роботі та високої швидкодії. Аналіз закордонних наукових публікацій [2-4] показує, що питанням удосконалення конструкцій струменевих захоплювачів, з метою забезпечення їх високих технічних характеристик, практично не приділялось уваги. Останню обставину підтверджує також аналіз конструкцій та характеристик струменевих захоплювальних пристроїв, котрі виготовляють відомі закордонні корпорації (Bosh Rexroth, Schmalz, SMC Pneumatics) [5-7].

Мета роботи. Проаналізувати динаміку та умови протікання газових потоків у соплових елементах і в проміжку між взаємодіючими поверхнями струменевого захоплювача та об'єкта маніпулювання, що дозволить виявити методи підвищення підйімальної здатності даних пристроїв. Запропонувати математичні моделі, дослідити

силові характеристики ежекційних струменевих захоплювачів з різними формами активної поверхні, обґрунтувати вибір параметрів найбільш раціональних конструкцій.

Основна частина. Типова конструктивна схема струменевого ежекційного захоплювача зображена на рис. 1. У корпусі 1 захоплювача встановлена конічна вставка 2, що утворює з внутрішньою поверхнею корпусу камеру 3 для підведення стисненого повітря через отвір 4, а з фаскою центрального отвору корпусу кільцеве конічне сопло 5. Кільцевий струмінь повітря, витікаючи через сопло 5 і заломлюючись до поверхні об'єкта маніпулювання 6, у подальшому, між торцем корпусу і об'єктом, утворює плоский радіальний потік. Висока швидкість струменя на виході з кільцевого сопла сприяє явищу ежекції, в результаті абсолютний тиск p_1 на торці конічної вставки знижується до величини, меншої за атмосферний $p_{ам}$. Це призводить до появи аеродинамічного ефекту притягання об'єкта до торця захоплювача.

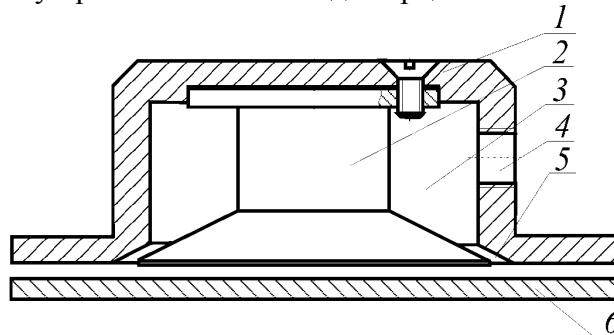


Рис. 1. Схема струменевого ежекційного захоплювача

Аналіз робіт [8, 9], а також даних експериментальних досліджень дозволяє виділити три характерні зони силової взаємодії витікаючого із кільцевого сопла струменя з поверхнею об'єкта (рис. 2): зону вільного турбулентного струменя повітря ($h_1 > 4 \dots 6$ мм); зону обмеженого турбулентного струменя ($0,4 \text{ мм} < h_1 < 4$ мм); зону пружної дії пневматичної подушки ($h_1 < 0,2$ мм). Наведені межі цих зон стосуються випадків, коли товщина кільцевого сопла h_0 не перевищує 0,15 мм, а різниця радіусів $r_2 - r_0$ становить 10...30 мм. Зона вільного турбулентного потоку повітря характеризується відсутністю контакту границь струменя, що розширюється у напрямку витікання, з поверхнею об'єкта (рис. 2а). Ежектуючі властивості вільного струменя призводять до утворення зони вихрового руху повітря та зниження статичного тиску на поверхні об'єкта. Величина розрідження в даному випадку є дуже низькою, що пояснюється підсмоктуванням атмосферного повітря у вихрову зону. Визначення закономірностей руху струменя та розподілу розрідження на поверхні об'єкта викликає значні труднощі, бо вимагає використання чисельних методів теорії турбулентних струменів [10] і тому доцільніше отримати їх на основі експериментальних даних у вигляді емпіричних залежностей.

При відстані між торцями $h_1 = 2 \dots 4$ мм границі кільцевого конічного струменя повітря розширюються у радіальному проміжку і на виході з нього дотикаються до торця об'єкта (рис. 2б, в). Такий випадок протікання струменя повітря в радіальному проміжку характеризується наявністю двох вихрових зон – на торці корпусу та на поверхні об'єкта. Причому розміри вихрової зони на торці корпусу суттєво залежать від кута α , а при $\alpha < 30^\circ$ вони дуже малі. Зближення торців до величини $h_1 = 0,2 \dots 1$ мм призводить до значного зменшення розмірів вихрових зон, стабілізації профілю швидкостей та формування суцільного радіального потоку. Крім цього, при такій відстані значно зростає швидкість потоку повітря у радіальному проміжку, що призводить до різкого зростання розрідження на торці об'єкта у зоні навпроти торця конічної вставки (рис. 2г). Зменшення відстані між торцями до величини $h_1 < 0,2$ мм приводить до формування ламінарного режиму руху потоку повітря та зростання втрат питомої енергії потоку на тертя в радіальному проміжку (рис. 2д). У результаті швидкість потоку суттєво зменшується, а в радіальному проміжку утворюється пружна пневматична подушка (рис. 2е).

Захоплення об'єкта струменевим захоплювачем відбувається з певної відстані h_{1max} за умови $F(h_{1max}) \geq G_{ом}$ (рис. 3). Захоплений об'єкт під дією зростаючого аеродинамічного ефекту, що досягає максимуму при $h_{1onm} = (2,5 \dots 3,5)h_0$, рухається у напрямку торця захоплювача. Далі рух об'єкта сповільнюється і при деякій відстані h_{1min} , що відповідає умові $F(h_{1min}) = G_{ом}$, він зупиниться (при $G_{ом} \rightarrow 0$, $h_{1min} = 0,12 \dots 0,16$ мм). Фіксацію притягнутого до торця захоплювача та вільноплаваючого на повітряній подушці об'єкта здійснюють за рахунок сил тертя об'єкта до конічної вставки 2 (рис. 1), торець якої в даному випадку повинен виступати над торцем корпусу на величину h_{1onm} .

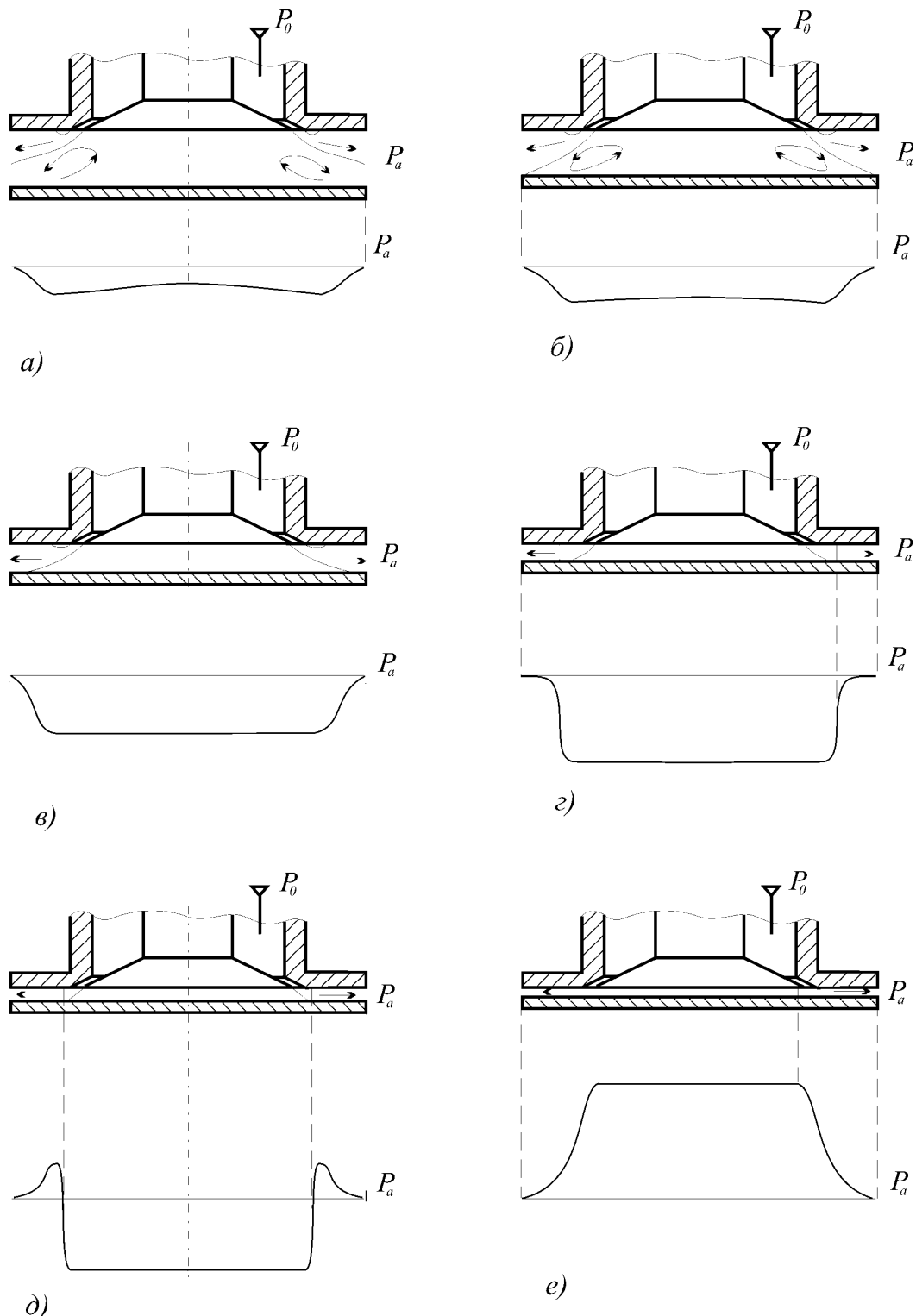


Рис. 2. Характер взаємодії витікаючого із кільцевого сопла струменя повітря з плоскою поверхнею об'єкта

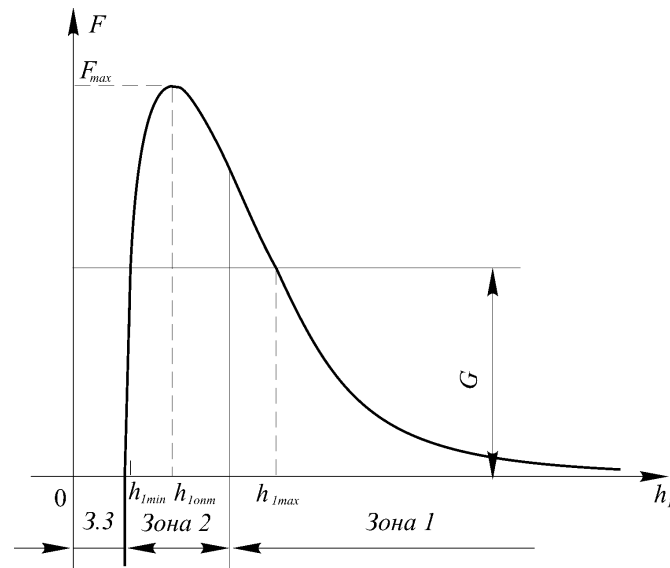


Рис. 3. Графік залежності присмоктуючої сили F від величини радіального проміжку h_1

Статичні, динамічні та витратні (енергетичні) характеристики струменевих захоплювальних пристроїв в основному залежать від: тиску живлення; конструктивних параметрів соплових елементів, які формують геометрію і напрямок витікання повітряного струменя; геометричних параметрів повітряного проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювального пристрою та об'єкта маніпулювання. Тиск повітря в робочій камері 3 захоплювача повною мірою визначає швидкість V_0 струменя на виході з кільцевого сопла 5 та величину масової витрати повітря G . У свою чергу швидкість повітря на виході із сопла та його масова витрата повною мірою визначають вантажопідймальність захоплювача, зону дії аеродинамічного ефекту та час захоплення об'єкта маніпулювання з відстані.

Для визначення швидкості потоку V_0 на виході з кільцевого сопла із камери, в якій підтримується постійний абсолютний тиск p_0 (площа поперечного перерізу камери набагато більша площі сопла), можна скористатися формулою Сен-Венана [9]

$$V_0 = \varphi \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p_1}{\rho_1} \right)}, \quad (1)$$

де $k=1,4$ – показник адіабати для повітря.

Коефіцієнт швидкості φ залежить від втрат питомої енергії потоку на вході повітря в сопло ζ_{ex} і втрат на тертя повітря до стінок сопла ζ_{mp} [11]:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{ex} + \zeta_{mp}}}. \quad (2)$$

Коефіцієнт ζ_{ex} залежить від умов входу потоку повітря з камери в кільцеве сопло і визначається з експериментальних таблиць [11]. Якщо вхід в сопло достатньо плавний, наприклад заокруглений з радіусом R , то при $R/h_0 > 5$, $\zeta_{ex} \rightarrow 0$. Для випадку входу в сопло, зображеному на рис. 1, $\zeta_{ex} = 0,05 \dots 0,1$.

Коефіцієнт ζ_{mp} можна визначити за формулою

$$\zeta_{mp} = \lambda_0 \frac{l_0}{D_{c0}}, \quad (3)$$

де l_0 – довжина кільцевого сопла; $D_{c0} = 2h_0$ – гідравлічний діаметр кільцевого сопла; λ_0 –

коефіцієнт в'язкого тертя повітря до стінок сопла, який залежить від числа Рейнольдса та шорсткості поверхонь сопла.

Масові витрати повітря можна підрахувати за формулами Сен-Венана-Ванцеля [9]:

для докритичного режиму витікання ($p_0/p_1 < 0,53$)

$$G = \mu S_0 p_0 \sqrt{\frac{2}{RT_0} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4)$$

для надкритичного режиму витікання ($p_0/p_1 > 0,53$)

$$G = \mu S_0 p_0 \sqrt{\frac{2}{RT_0} \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, \quad (5)$$

де $\mu = \varphi \varepsilon$ – коефіцієнт витрати повітря, що витікає із сопла; ε – коефіцієнт стиснення потоку в соплі (при $l_0/h_0 > 4$, $\varepsilon = 1$ [11]); $S_0 = 2\pi \cdot r_0 \cdot h_0$ – площа вихідного перерізу кільцевого сопла; $R = 287,14$ Дж/(кг·°К) – газова стала для повітря; T_0 – абсолютна температура повітря.

Істотніший вплив на характер течії газового потоку і, як наслідок, на характеристики силової дії струменевого захоплювача на об'єкт маніпулювання, має нахил струменя повітря відносно площини об'єкта (торця корпусу) на певний кут α . Наприклад, при кутах $30^\circ < \alpha < 90^\circ$ кільцевий потік повітря діє на об'єкт маніпулювання також і реактивною відштовхуючою силою. При кутах нахилу сопла $\alpha < 20^\circ$ реактивна сила практично зникає, бо витікаючий з неї струмінь, за рахунок ефекту Коанда [10], “прилипає” до торця захоплювального пристрою.

Отже, до конструкції соплової частини струменевого захоплювача можна поставити такі основні вимоги: вхід сопла повинен бути заокругленим з радіусом $R > 5h_0$; довжина кільцевого сопла повинна бути $l_0 = (4 \dots 6)h_0$; шорсткість поверхні сопла повинна бути якомога меншою; кут нахилу щілини сопла $\alpha < 20^\circ$. Слід зауважити, що виконання приведених вище вимог до конструкції соплової частини струменевого захоплювача, при сталих інших конструктивних параметрах і тиску живлення p_0 , дозволяє підвищити силові характеристики лише на 2-3%.

Значно суттєвіший вплив на силові характеристики даних захоплювачів має форма активної (взаємодіючої з об'єктом) поверхні торця захоплювача. Вона повинна бути гладкою, тобто не мати ніяких виступів і заглибин, які б перешкоджали потоку повітря, і забезпечувати плавне розширення потоку з метою його безвідривного режиму руху. Активна поверхня захоплювача може бути плоскою, конічною, сферичною або складатися з комбінації цих елементарних поверхонь. Раціональні конструкції струменевих ежекційних захоплювачів зображено на рис. 4. Вони забезпечують максимальну присмоктуючу силу, виключають можливість відриву об'єкта від торця захоплювача та забезпечують стабільність положення об'єкта при його безконтактному утримуванні.

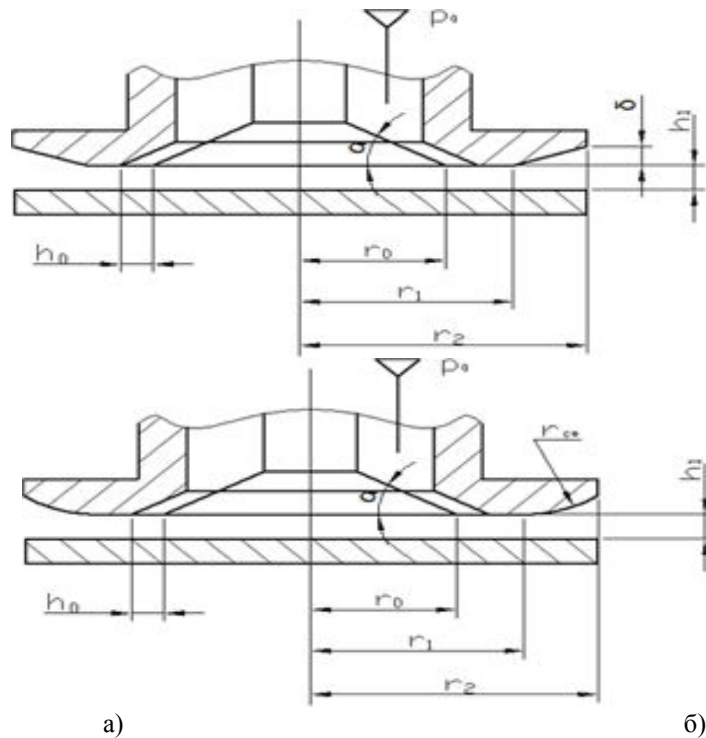


Рис. 4. Схеми ежекційних струменевих захоплювачів з різними формами активної поверхні:
а) плоско-конічна; б) плоско-сферична

Характер течії повітряного потоку в радіальному проміжку між активною поверхнею струменевого захоплювача та об'єкта маніпулювання досить складний. При надлишковому тиску живлення захоплювача стисненим повітрям, понад 0,1 МПа [8], потік входить у кільцеве сопло зі швидкістю, що дорівнює місцевій швидкості звуку. Внаслідок збільшення площі поперечного перетину сопла в його вихідному перетині потік досягає надзвукової швидкості. Подальше розширення потоку в радіальному проміжку забезпечує зростання надзвукової швидкості, а за рахунок явища ежекції статичний тиск у зоні навпроти конічної вставки спадає до величини p_1 , меншої за атмосферний. Зростання швидкості відбувається до певного радіуса, на якому відбувається гальмування потоку, що супроводжується різким зростанням тиску та зменшенням швидкості потоку до дозвукової. У результаті подальшого розширення швидкість дозвукового потоку V_r спадає, а статичний тиск p_r у радіальному проміжку плавно зростає до величини атмосферного.

Для спрощення теоретичних досліджень силових характеристик даних захоплювачів доцільно зробити такі припущення: площа поперечного перерізу камери захоплювача набагато більша площі прохідного січення кільцевого сопла; значення всіх параметрів газового потоку на радіусі r – сталі в межах виділеного елементарного кільця радіальному проміжку; потік повітря входить у кільцеве сопло зі швидкістю, що дорівнює швидкості звуку для даних умов; максимальне значення швидкості V_0 надзвукового потоку та його перехід у дозвуковий відбувається у вихідному перерізі кільцевого сопла; термодинамічний процес протікання надзвукового потоку – адіабатичний, дозвукового – ізохоричний; характер розподілу швидкостей потоку на виході з кільцевого сопла та на будь-якому радіусі радіального проміжку приймається рівномірним.

Результуюча сила F , з якою захоплювач діє на об'єкт,

$$F = F_1 + F_2, \quad (6)$$

$$F_1 = \pi r_1^2 (p_{am} - p_1), \quad (7)$$

$$F_2 = 2\pi \int_{r_0}^{r_2} (p_{am} - p_r) r dr, \quad (8)$$

де F_1, F_2 – сили, викликані розрідженням у проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта відповідно у зонах навпроти конічної вставки та навпроти торця корпусу; $p_{am}=0,1033$ МПа – атмосферний тиск за нормальних умов; p_1, p_r – абсолютні значення тиску відповідно у зоні навпроти конічної вставки та на радіусі r ; r_0 – радіус конічної вставки; r_2 – радіус корпусу захоплювача.

Для визначення характеру розподілу тиску p_r в радіальному проміжку запишемо рівняння Бернуллі для радіусів r і r_2 [9]

$$\frac{p_r}{\rho_{am}} + \frac{V_r^2}{2} = \frac{p_{am}}{\rho_{am}} + \frac{V_2^2}{2} + E_{r-r_2}, \quad (9)$$

де V_r, V_2 – швидкості потоку повітря на радіусах r і r_2 відповідно; E_{r-r_2} – втрати питомої енергії потоку на проміжку від r до r_2 .

Елементарні втрати питомої енергії потоку dE на елементарному відрізку dr знайдемо за відомою залежністю [11]

$$dE = \lambda_{cp} \frac{V_r^2}{2} \frac{dr}{D_z}, \quad (10)$$

де λ_{cp} – коефіцієнт в'язкого тертя повітря до активної поверхні захоплювача та об'єкта маніпулювання, який залежить від числа Рейнольдса та шорсткості поверхонь; $D_z = 2h_r$ – гідравлічний діаметр потоку на радіусі r .

Коефіцієнт в'язкого тертя λ для турбулентного режиму руху повітря зручно розрахувати за емпіричною формулою [11]

$$\lambda = 0,11K_n \left(\frac{\Delta}{D_z} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

де K_n – коефіцієнт, що враховує неокруглість поперечного перерізу потоку (для кільцевого перерізу $K_n=1,1$) [11]; Δ – еквівалентна абсолютна шорсткість поверхонь, формуючих потік повітря, яку можна прийняти рівною шорсткості по Ra поверхні об'єкта маніпулювання; Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса Re для потоків будь-якої форми визначають з [11]

$$\text{Re} = \frac{\rho V D_z}{\mu_0},$$

де $\mu_0=1,71 \cdot 10^{-5} + 4,94 \cdot 10^{-8}t$ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, кг/(с·м) [9]; t – температура оточуючого середовища, °С.

Враховуючи масові витрати повітря в радіальному кільцевому проміжку $G = V_r \rho_{am} 2\pi r h_r$, отримаємо

$$\text{Re} = \frac{G}{\pi \mu_0 r} \quad \text{і} \quad \lambda = 0,121 \left(\frac{\Delta}{2h_r} + \frac{68\pi \mu_0 r}{G} \right)^{0,25}. \quad (12)$$

Поточні значення висоти радіального проміжку h_r для різних варіантів активної поверхні захоплювача (рис. 4) визначали так:

плоска – $h_r = h_1$;

плоско-конічна – $h_r = h_1$ при $r \leq r_1$ і $h_r = h_1 + \frac{\delta}{r_2 - r_1}(r - r_1)$ при $r > r_1$;

плоско-сферична – $h_r = h_1$ при $r \leq r_1$ і $h_r = h_1 + r_{cф} - \sqrt{r_{cф}^2 - (r - r_1)^2}$ при $r > r_1$,

$$r_{cф} = \frac{(r_2 - r_1)^2 + \delta^2}{2\delta}.$$

Згідно з рівнянням нерозривності потоку швидкості

$$V_r = \frac{G}{2\pi \rho_{am} r h_r}; \quad V_2 = \frac{G}{2\pi \rho_{am} r (h_1 + \delta)}. \quad (13)$$

Повні втрати питомої енергії потоку знайдемо, проінтегрувавши рівняння (10) та враховуючи (11) і (12):

$$E_{r-r_2} = \frac{1}{16\pi^2} \frac{G^2}{\rho_{am}^2} \int_r^{r_2} \frac{0,121 \left(\frac{\Delta}{2h_r} + \frac{68\pi\mu_\delta r}{G} \right)^{0,25}}{h_r^3 r^2} dr. \quad (12)$$

Підставивши результат в (9), після перетворень отримаємо

$$p_r = p_{am} - \frac{G^2}{8\pi^2 \rho_{am}} \left[\frac{1}{h_r^2 r^2} - \frac{1}{(h_1 + \delta)^2 r_2^2} - \frac{1}{2} \int_r^{r_2} \frac{0,121 \left(\frac{\Delta}{2h_r} + \frac{68\pi\mu_\delta r}{G} \right)^{0,25}}{h_r^3 r^2} dr \right]. \quad (13)$$

За допомогою представленої вище методики проводили розрахунки характеру розподілу тиску повітря в радіальному проміжку (рис. 5) та зміни складової F_2 сили притягання захоплювачем об'єкта залежно від відстані h_1 між ними (рис. 6). Розрахунки проводили для захоплювачів з плоскою, плоско-конічною та плоско-сферичною активними поверхнями при конструктивних параметрах $r_0=20$ мм, $r_1=25$ мм, $r_2=35$ мм, $h_0=0,1$ мм, $\delta=0,2$ мм та абсолютному тиску живлення $p_0=300$ кПа.

Для забезпечення безвідриного режиму руху потоку повітря в радіальному проміжку необхідно, щоб градієнт тиску $\frac{dp_r}{dr}$ змінювався якнайменше, тобто наближався до сталого значення. Дана вимога відповідає характеру розподілу тиску в радіальному проміжку близькому до лінійного. Цій вимозі наповніше відповідає захоплювач із комбінованою плоско-сферичною активною поверхнею (рис. 4б).

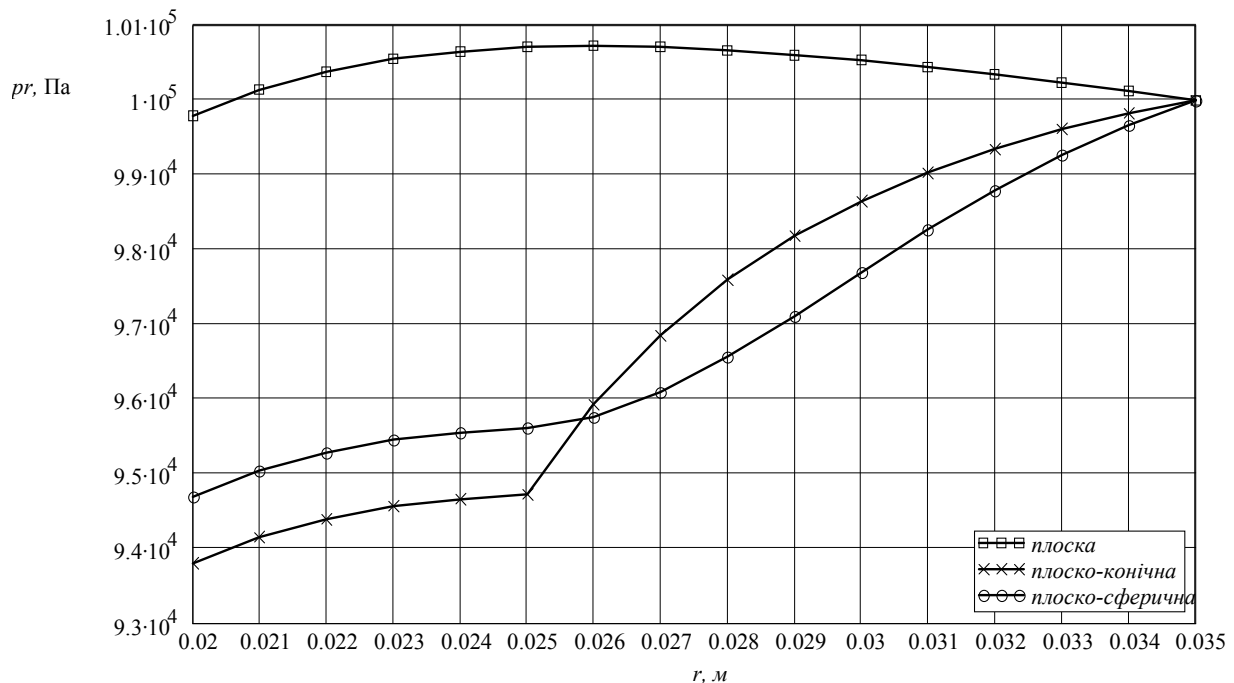


Рис. 5. Результати теоретичних досліджень характеру розподілу тиску повітря p_r в радіальному проміжку для захоплювачів з різними формами активної поверхні ($h_1=0,3$ мм)

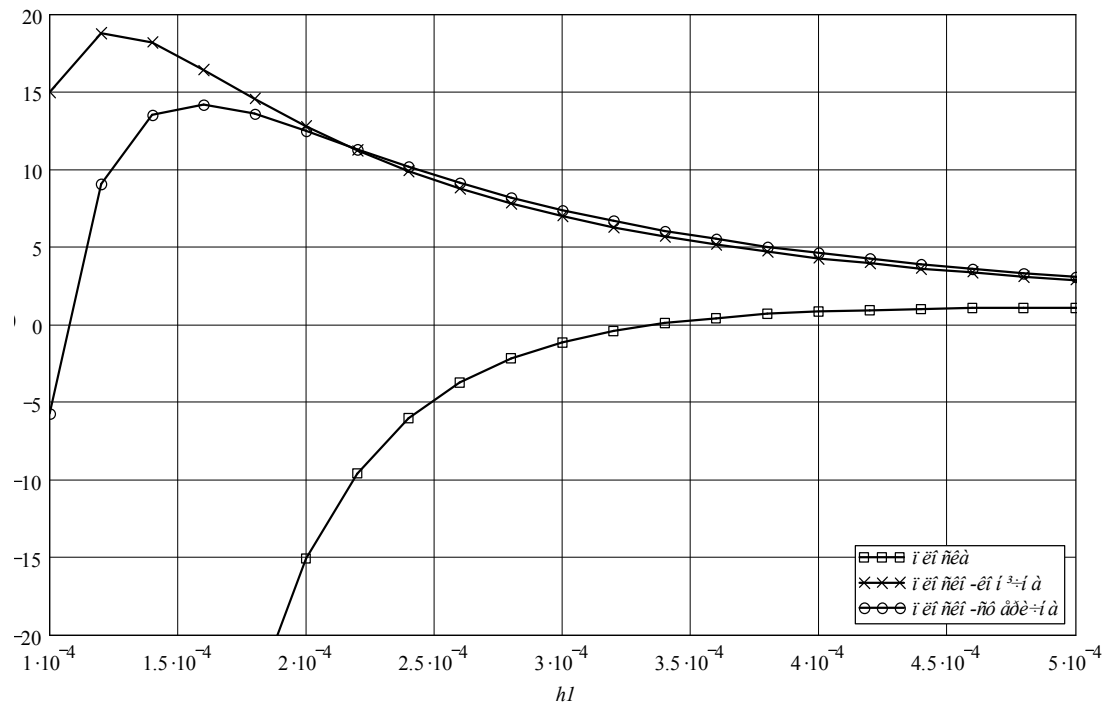


Рис. 6. Графіки залежності складової F_2 [Н] сили притягання об'єктів від відстані h_1 [м] для захоплювачів з різними формами активної поверхні

Для визначення абсолютного тиску p_1 на торці захоплювача проведемо газодинамічний аналіз процесу витікання потоку повітря із кільцевого сопла та його розширення в радіальному проміжку h_1 до радіуса r_1 . Для цього складемо рівняння імпульсів сил у проекціях на вісь x для виділеного елемента $d\varphi$ радіального проміжку h_1 (рис. 7):

$$dGV_0 \cos \varphi + p_1 h_1 r_0 d\varphi \cos \varphi + 2h_1 \int_{r_0}^{r_1} p_1 dr \sin \frac{d\varphi}{2} \cos \varphi + 2h_1 \int_{r_0}^{r_1} p_r dr \sin \frac{d\varphi}{2} \cos \varphi =$$

$$= dGV_1 \cos \varphi + p_{r1} h_1 r_1 d\varphi \cos \varphi + dF_{mp} \quad (14)$$

де $dG = V_0 \rho_0 h_0 r_0 d\varphi$ – елементарні масові витрати повітря через кільцеве сопло; dF_{mp} – елементарна сила в'язкого тертя потоку повітря до торцевих поверхонь захоплювача й об'єкта.

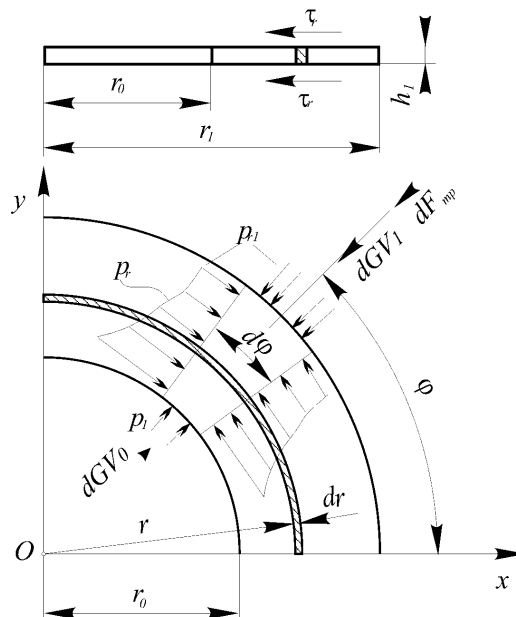


Рис. 7. Схема для розрахунку розрідження на торці конічної вставки

Диференціал другого порядку від сили тертя d^2F_{mp} визначимо як подвійний добуток напруження тертя τ_r на елементарну площу $dS=dr \cdot r \cdot d\varphi$. У проекції на вісь x

$$d^2F_{mp} = 2\tau_r r dr d\varphi \cos\varphi \quad (15)$$

Напруження тертя на радіусі r можна підрахувати за формулою [8]

$$\tau_r = \frac{\rho_{am} V_r^2}{8} \lambda_{cp}.$$

Допускаючи, що коефіцієнт в'язкого тертя на проміжку від r_0 до r_1 – сталий і дорівнює середньому значенню

$$\lambda_{cp} = 0,121 \left(\frac{\Delta}{2h_1} + \frac{34\pi\mu_0(r_0 + r_1)}{G} \right)^{0,25},$$

проінтегрувавши (15), отримаємо

$$dF_{mp} = \frac{\lambda_{cp}}{4} \frac{V_0^2 \rho_0^2 r_0^2 h_0^2}{\rho_{am} h_1^2} \cos\varphi d\varphi \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} = \frac{\lambda_{cp}}{2} \frac{V_0^2 \rho_0^2 r_0^2 h_0^2}{\rho_{am} h_1^2} \ln \frac{r_1}{r_0} \cos\varphi d\varphi. \quad (16)$$

Проінтегрувавши (13) у межах від r_0 до r_1 , враховуючи $G=2\pi V_0 \rho_0 r_0 h_0$, після перетворень знайдемо

$$\int_{r_0}^{r_1} p_r dr = p_{r1}(r_1 - r_0) + \frac{V_0^2 \rho_0^2 r_0^2 h_0^2}{2\rho_{am} h_1^2} \left[\frac{r_1 - r_0}{r_1^2} + \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0} + \frac{\lambda_{cp}}{2h_1} \left(\ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{r_1 - r_0}{r_1} \right) \right]. \quad (17)$$

Підставивши (16) і (17) в (14), враховуючи, що при малих $d\varphi$ $\sin(d\varphi/2)=d\varphi/2$, отримаємо рівняння

$$V_0^2 \rho_0 \left[r_0 h_0 - \frac{\rho_0 r_0^2 h_0^2}{2\rho_{am} h_1} \left(\frac{r_0^2 + r_1^2}{r_1^2 r_0} + \frac{\lambda_{cp}}{2h_1} \frac{r_1 - r_0}{r_1} \right) \right] = (p_{r1} - p_1) r_0 h_1.$$

Використовуючи формулу (1) і враховуючи, що для адіабатного процесу $\frac{p}{\rho^k} = const$, після перетворень отримаємо

$$\frac{2k\varphi^2}{k-1} \left(p_0^{\frac{k-1}{k}} p_1^{\frac{1}{k}} - p_1 \right) \left[r_0 h_0 - \frac{\rho_0 r_0^2 h_0^2}{2\rho_{am} r_1 h_1} \left(\frac{r_0}{r_1} + \frac{r_1}{r_0} + \frac{\lambda_{cp}(r_1 - r_0)}{2h_1} \right) \right] = (p_{r1} - p_1) r_0 h_1. \quad (18)$$

Допускаючи, що $\rho_0/\rho_{am} \approx 1$, рівняння для визначення p_1 матиме вигляд

$$\left[\left(\frac{(p_{r1} - p_1) \frac{(k-1)h_1}{2k\varphi^2 h_0 \left[1 - \frac{r_0 h_0}{2r_1 h_1} \left(\frac{r_0}{r_1} + \frac{r_1}{r_0} + \frac{\lambda_{cp}(r_1 - r_0)}{2h_1} \right) \right]} + p_1 \right) p_1^{\frac{1}{k}} \right]^{\frac{k}{k-1}} - p_0 = 0. \quad (19)$$

Зведені результати експериментальних досліджень і розрахунків за представленою вище методикою зображено на рис. 8. Вони відповідають таким параметрам: $r_0=20$ мм, $r_1=25$ мм, $r_2=35$ мм, $h_0=0,1$ мм, $\delta=0,2$ мм, $h_1=0,3$ мм. Відхилення теоретичних значень від експериментальних, у даному випадку, не перевищує 18%.

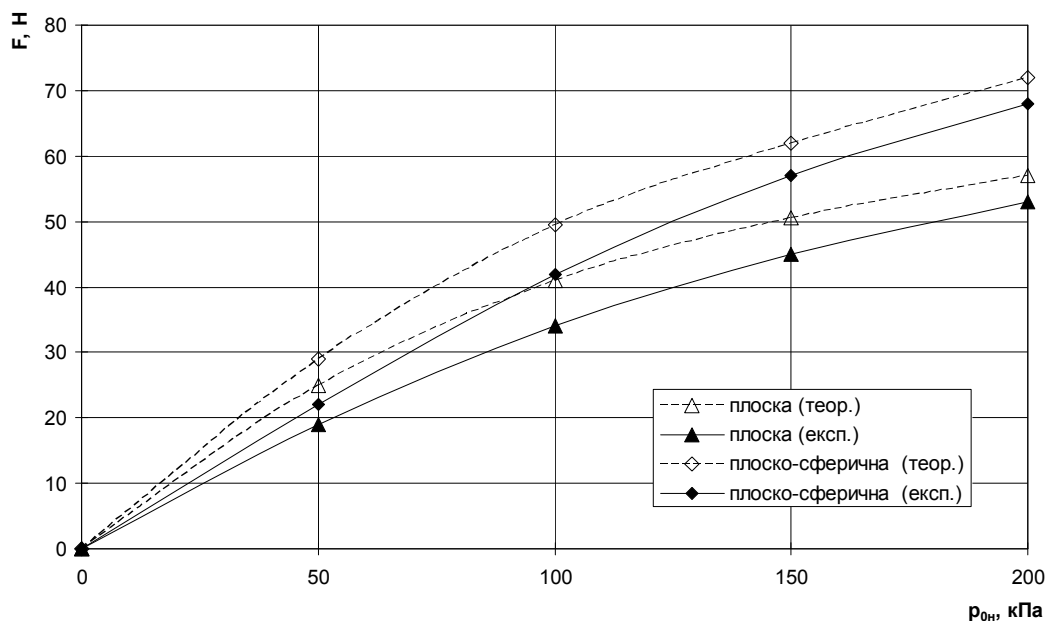


Рис. 8. Результати теоретичних та експериментальних досліджень силових характеристик струменевих захоплювальних пристроїв

Також у процесі експериментальних досліджень встановлено, що на максимальну відстань дії аеродинамічного ефекту значною мірою впливає кут нахилу щілини сопла α та різниці діаметрів r_2-r_0 . Наприклад, при різниці радіусів $r_2-r_0=20\dots40$ мм та $\alpha=30\dots45^\circ$ зона дії аеродинамічного ефекту буде найбільшою і при зміні надлишкового тиску живлення захоплювача в межах $0,1\dots0,3$ МПа становитиме $10\dots30$ мм.

Висновки. Проведені дослідження підтверджують необхідність удосконалення конструкції струменевих ежекційних захоплювачів, зокрема форми соплової частини та активних поверхонь. Теоретичні та експериментальні дослідження захоплювачів з комбінованою плоско-сферичною активною поверхнею показали, що їх силові характеристики вищі від захоплювачів з плоским торцем на $20\dots30\%$. У подальшому будуть проведені дослідження енергетичних характеристик струменевих захоплювачів з метою пошуку таких параметрів, які забезпечать їх високі експлуатаційні показники.

Література

1. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: справочник / Ю.Г. Козырев. –М.: Машиностроение, 1983.– 375с.
2. Babur Ozelik, Fehmi Erzincanli, Fehim Findik. Evaluation of handling results of various materials using a non-contact end-effector. *Industrial Robot: An International Journal*. Volume 30, Number 4, 2003 pp. 363–369.
3. Babur Ozelik, Fehmi Erzincanli. Examination of the movement of a woven fabric in the horizontal direction using a non-contact end-effector. Gebze Institute of Technology, Department of Design and Manufacturing Engineering, Published online: 8 December 2004.
4. S. Davis, J.O. Gray, D.G. Caldwell, An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (2) (2008) 249–257.
5. Bosch Rexroth AG, “Series NCT Brochure” Order no. 000-000-000-0/JJJJ-MM/EN, www.boschrexroth.com
6. Grippers with special operating principles. Floating suction pad SBS, http://www.millsom.com.au/vac_components/02_Suction_Pads/SBS.pdf
7. SMC Corporation, Non-contact conveyance is possible - Series XT661, <http://www.smcworld.com>
8. Проць Я.И. Газодинамический анализ струйных захватов плоских заготовок / Я.И.Проць, В.Б.Савкив // Оптимизация производственных процессов. Вып. 1. – Севастополь: Издательство СевГТУ, 1999. – С. 63–68.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 888с.
10. Jerhard Bollrich. Technische Hydromechanik. Band 2. Spezielle probleme. / Jerhard Bollrich und Autorenkollektiv. – Berlin: VEB Verlag fur Bauwesen, 1989. – 680s.
11. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 560с.

Отримано 6.09.2010 р.