УДК.621.865.8

В. Савків, Я. Проць

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЕВИХ ЗАХОПЛЮВАЧІВ ДЕТАЛЕЙ ЗА ЇХ ВНУТРІШНЮ ЦИЛІНДРИЧНУ ПОВЕРХНЮ

У статті дається опис та методика визначення силових параметрів струменевих захоплювачів. Встановлені теоретичні залежності між параметрами захоплювача та робочим середовищем.

Умовні позначення:

F - сила притягування заготовки захоплювачем, Н;

P_0, P_1, P_a – абсолютний тиск повітря в камері 1, на торці захоплювача та при нормальних умовах відповідно, Па;

$F_{тр1}, F_{тр2}$ – відповідно сила тертя потоку повітря до бічної поверхні захоплювача та внутрішньої циліндричної поверхні заготовки, Н;

d_1, d_2 – відповідно діаметр захоплювача та внутрішній діаметр заготовки, м;

G – масові витрати повітря, кг/с;

S – площа поперечного перерізу потоку, м^2;

ρ – густина основного потоку, кг/м^3;

V – швидкість основного потоку повітря, м/с;

dP – приріст тиску у напрямі руху потоку, Па;

τ – напруження тертя діючі на елемент бічної поверхні каналу, Па;

dS – елемент бічної поверхні каналу, м^2;

dx – елемент довжини потоку, м;

ΣdF_i – сума імпульсів сил зовнішнього впливу, Н;

dG_i – витрати маси підвідного (відвідного) повітря, кг/с;

V_i – проекції швидкості підвідного повітря на напрямок основного потоку, м/с;

dV – приріст швидкості у напрямі руху потоку, м/с;

k – показник адіабати;

P – тиск основного потоку повітря, Па;

R – газова стала, Дж/(кг К);

T – абсолютна температура повітря, К;

S_0, S_1, S_3 – відповідно площі поперечного перерізу повітряного потоку при виході із щілини, в січенні 2-2 потоку та отвору у заготовці, м^2;

$F_{тр}$ – сила тертя потоку до поверхонь заготовки і захоплювача, Н;

G_1, G_3 – відповідно масові витрати повітря через щілину струменевого захоплювача та отвір у заготовці, кг/с;

V_1, V_2, V_3 – відповідно швидкості активного потоку повітря в січенні 1-1, січенні 2-2 та пасивного потоку в січенні 1-1, м/с;

τ_1, τ_2 – напруження тертя діючі на активну бічну поверхню захоплювача та внутрішню циліндричну поверхню заготовки відповідно, Па;

$S_{б1}, S_{б2}$ – відповідно площі бічної поверхні захоплювача та внутрішньої циліндричної поверхні заготовки, м^2;

l_0, l_1 – відповідно довжина кільцевої щілини та активної бічної поверхні захоплювача, м;

$П, П_1$ – периметр труби та січення 2-2 відповідно, м;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;

$D_г$ – гідравлічний діаметр потоку, м;

$\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ – коефіцієнт опору тертя поверхні щілини, бічної поверхні захоплювача та внутрішньої циліндричної поверхні заготовки відповідно;

ρ_2 – густина повітря при нормальних умовах, кг/м^3;

$K_н$ – коефіцієнт, що враховує некруглість поперечного перерізу потоку;

$D_{г0}, D_{г1}$ – відповідно гідравлічний діаметр потоку повітря в щілині та в січенні 2-2, м;

Δ_0 – еквівалентна абсолютна шорсткість щілини м;

ζ_0 – коефіцієнт втрати тиску в щілині;

T_a, T_0 – абсолютна температура повітря при нормальних умовах та в камері 1 захоплювача відповідно, К;

$\zeta_{вх0}, \zeta_{тр0}$ – коефіцієнти які характеризують втрати тиску повітря на вході в щілину та на тертя в щілині відповідно;

h_0 – висота кільцевої щілини, м;

μ_0 , μ_2 - коефіцієнти витрат повітря через щілину та отвір у заготовці відповідно;

ε_0 - коефіцієнт стиснення потоку повітря в щілині;

d_3 - діаметр отвору у заготовці, м.

При автоматизації завантаження технологічного обладнання штучними заготовками часто виникає необхідність захоплення останніх за внутрішню (циліндричну, конічну) поверхню. Для розв'язання даної проблеми широко використовують механічні та захоплювачі з надувними еластичними камерами [1]. У випадку захоплення неміцних, пружних, крихких та нагрітих до високих температур заготовок більш перспективними є струменеві захоплюючі пристрої [5]. У порівнянні із попередніми вони мають такі переваги:

1) деталь не знаходиться у безпосередньому контакті із захоплювачем, тому виключена можливість її пошкодження або забруднення;

2) забезпечують високу точність базування та інтенсивне охолодження заготовок;

3) мають кращі динамічні характеристики (час захоплення деталей - 0.1...0.5с.);

4) конструктивно прості та довговічні.

На рис.1 приведена конструктивна схема струменевого ежекційного захоплювача з кільцевою конічною щілиною, який призначений для захоплення і центрування деталей з внутрішньою циліндричною або конічною поверхнею (типу стаканів кришок та ін.). В корпусі 2 захоплювача встановлена конічна тарілка 3, яка утворює разом з ним камеру 1 та кільцеву конічну щілину 4. Захоплювач працює за таким принципом. У камеру 1 підводиться стиснуте повітря, яке витікає щілиною 4 висотою h_0 у атмосферу. При захопленні заготовки 5 кільцевий потік повітря протікає в зазорі, утвореному внутрішньою поверхнею заготовки та бічною поверхнею захоплювача, викликаючи за рахунок ежекції пониження абсолютного тиску P_1 у камері 6 до величини меншої за атмосферний P_a. При наявності в заготовці отвору 7 відбувається підсмоктування повітря, що приводить до зменшення величини розрідження у камері 6.

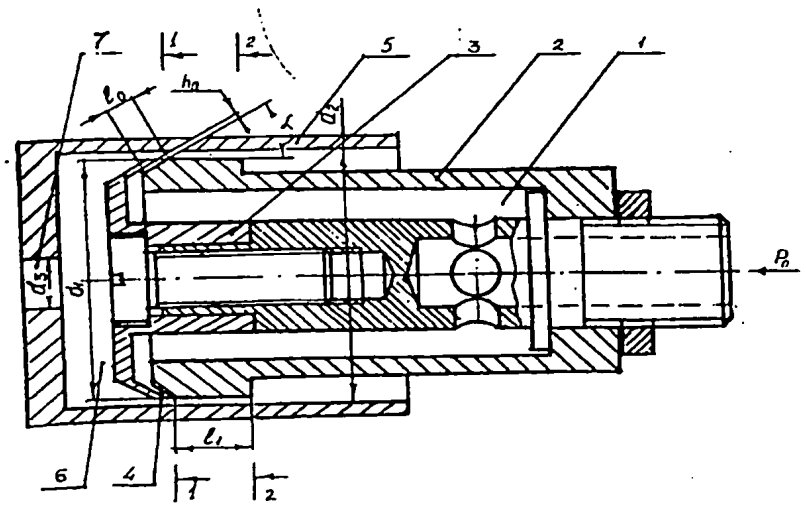

Рис. 1. Конструктивна схема СЗП

Вантажопідйомність струменевого захоплювача F пропорційна величині розрідження $P_a - P_1$ і визначається за формулою:

$$F = (P_a - P_1)\frac{\pi d_2^2}{4}. \quad (1)$$

Для визначення абсолютного тиску P_1 проведемо газодинамічний аналіз процесу витікання та розширення потоку повітря в щілині, утвореній бічною поверхнею захоплювача та внутрішньою поверхнею заготовки.

Основними рівняннями газового потоку є відомі рівняння нерозривності, кількості руху, енергії та рівняння стану ідеального газу [2]. Введемо деякі припущення. Нехай: 1) рух газу усталений; 2) масові сили відсутні; 3) енергетичний обмін, а також теплообмін з навколишнім середовищем не відбувається (рух газу розглядається адіабатичним). Тоді система основних рівнянь матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} G = S\rho V = const \\ \dfrac{k}{k-1}\dfrac{P}{\rho} + \dfrac{V^2}{2} = const \\ P = \rho RT, \dfrac{P}{\rho^k} = const \\ S\,dP + \tau\,dS + \sum dF_i = \sum dG_i V_i - \left[\dfrac{\sum dG_i}{G} + \dfrac{dV}{V}\right] GV \end{cases} . \quad (2)$$

На основі (2) складемо рівняння кількості руху для січень 1-1 і 2-2 струменевого захоплювача для деталей з отвором (рис.1). В першому наближенні допустимо, що розподіл швидкостей в січеннях 1-1 і 2-2 рівномірний, тому рівняння кількості руху буде:

$$S_1(P_2 - P_1) + F_{тр} = G_3V_3 - \left[G_3V_2 + G_1(V_2 - V_1)\right], \quad (3)$$

де $S_1 = \pi/4\,(d_2^2 - d_1^2)$ - площа поперечного перерізу газового потоку; $P_2 = P_a = 0{,}1033$ МПа - абсолютний тиск потоку в січенні 2-2, рівний атмосферному. В розрахунках добутком $G_3 V_3$ можна знехтувати у порівнянні з іншими складовими рівняння (3).

Сила тертя потоку до стінок захоплювача та заготовки визначається за формулою:

$$F_{тр} = F_{тр1} + F_{тр2} = \tau_1 S_{б1} + \tau_2 S_{б2}, \quad (4)$$

тут $S_{б1} = \pi d_1 l_1$, $S_{б2} = \pi d_2 l_1$. Напруження тертя τ можна виразити, враховуючи, що різниця сил тиску $S\,dP$, діючих на виділений елемент газу dx, при рівномірному русі в трубі рівна силі тертя на стінки труби, тобто

$$SdP = \tau\,\Pi dx \quad . \quad (5)$$

Зміну тиску dP на елементарній ділянці, обумовлену дією сил тертя, знаходимо за допомогою формули:

$$dP = \lambda\,\frac{\rho V^2}{2}\frac{dx}{D_г}, \quad (6)$$

де $D_г = 4S/\Pi$ - гідравлічний діаметр труби. Підставляючи dP, знайдемо:

$$\tau = \lambda\frac{S}{\Pi D_г}\frac{\rho V^2}{2} = \lambda\frac{\rho V^2}{8}. \quad (7)$$

Таким чином, напруження тертя не залежить від форми поперечного перерізу труби, а визначається коефіцієнтом опору λ та динамічним підпором $\frac{\rho V^2}{2}$. Тому можна записати:

$$\begin{cases} \tau_1 = \lambda_1 \dfrac{\rho_2 V_2^2}{8} \\ \tau_2 = \lambda_2 \dfrac{\rho_2 V_2^2}{8} \end{cases}. \tag{8}$$

На основі формул (4) та (8) отримаємо:

$$F_{mp} = \frac{\pi}{8} \rho_2 V_2^2 l_1 (\lambda_1 d_1 + \lambda_2 d_2), \tag{9}$$

причому ρ_2=1,23 кг/м^3. Коефіцієнти втрат на тертя λ_1 і λ_2 можна знайти за емпіричною формулою Альтщуля [3], враховуючи, що гідравлічний діаметр потоку

$$D_{z1} = \frac{4S_1}{\Pi_1} = \frac{4\pi\left(d_2^2 - d_1^2\right)}{4\pi\left(d_1 + d_2\right)} = d_2 - d_1. \tag{10}$$

Швидкість потоку в січенні 2-2 визначимо з рівняння системи (1) у вигляді

$$V_2 = \frac{G_1 + G_2}{S_1 \rho_2}. \tag{11}$$

Швидкість потоку V_1 в січенні 1-1 визначається за допомогою формули Сен-Венана для швидкості витікання газу із камери 1, в якій підтримується постійний тиск P_0, через щілину (площа поперечного перерізу щілини набагато більша площі поперечного перерізу камери 1) [4]

$$V_1 = \varphi_0 \sqrt{2RT_0 \frac{k}{k-1}\left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \tag{12}$$

де R=287.14Дж/кг К. Тут коефіцієнт швидкості φ_0 є функцією коефіцієнта опору ζ_0

$$\varphi_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_0}} = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_{ex0}+\zeta_{mp0}}}, \tag{13}$$

причому ζ_{ex0}=0.05 [3]. Для кільцевого потоку повітря

$$\begin{cases} \zeta_{mp0} = \lambda_0 \dfrac{l_0}{D_{z0}} \\ \lambda_0 = 1.1 \cdot 0.11 \left(\dfrac{\Delta_0}{D_{z0}}\right)^{0.25} \\ D_{z0} = \dfrac{4S_0}{\Pi_0} \cong \dfrac{4\pi d_1 h_0}{2\pi d_0} = 2h_0 \end{cases}. \tag{14}$$

В кінцевому випадку отримаєм

$$\varphi_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{вх0} + 0.121\left(\frac{\Delta_0}{2h_0}\right)^{0.25} \frac{l_0}{2h_0}}}. \quad (15)$$

Масові витрати повітря через щілину G_1 (при $l_0/h_0 < 10$) визначаються за допомогою формули Сен-Венана Ванцеля для докритичного режиму витікання [4]

$$G_1 = \mu_0 S_0 P_0 \sqrt{\frac{2}{RT_0}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}, \quad (16)$$

причому коефіцієнт витрат

$$\mu_0 = \varphi_0 \varepsilon_0 , \quad (17)$$

де ε_0 =1 при l_0/h_0 >4 [3].

Масові витрати G_2 через отвір в деталі визначаються аналогічно (16).

$$G_2 = \mu_2 S_3 P_a \sqrt{\frac{2}{RT_a}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{P_1}{P_a}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_a}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}, \quad (18)$$

де μ_2 - коефіцієнт витрат повітря через отвір [3].

Величина кута нахилу кільцевої конічної щілини α=0...30° на величину абсолютного тиску P_1 не впливає. При експериментальних дослідженнях захоплювачів із кутами нахилу щілини α>45°, спостерігалось зменшення величини розрідження P_a-P_1 по експоненційній залежності.

Знаючи конструктивні параметри струменевого захоплювача (h_0, l_0, Δ_0, ε_0, d_1, l_1), параметри заготовки (d_2, S_3, μ_3), величину абсолютного тиску P_0 в камері 1, та підставляючи (9; 11; 12; 16; 18) в формулу (3), отримаємо дробово степеневе рівняння з однією невідомою P_1, яке можна розв'язати наближеним методом із використанням ЕОМ. На рис. 2, 3, 4 показані результати розрахунку виконані за допомогою ЕОМ та відповідні їм експериментальні дані, які відповідають таким конструктивним параметрам: l_0=0.003м; Δ_0=0.000005м; ε_0=0.05; d_1=0.035м; l_1=0.01м; Δ_1=0.00004м; Δ_2=0.00006м; α=30°. Аналіз приведених характеристик струменевого захоплювача вказує на співпадання теоретичних розрахунків з експериментальними даними (максимальна відносна похибка δ=7%).

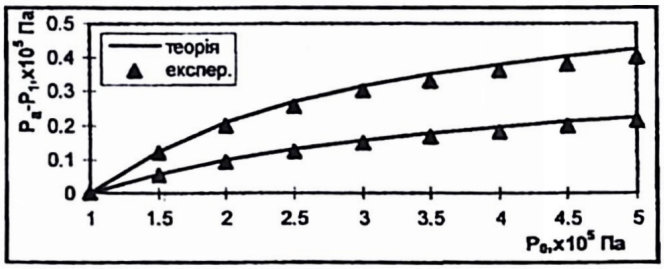

Рис. 2. Залежність розрідження P_a-P_1 від підвідного тиску P_0 при d_2=0.036м, d_3=0 (верхня крива 1 відповідає щілині h_0=0.0002 м, нижня - h_0=0.0001м)

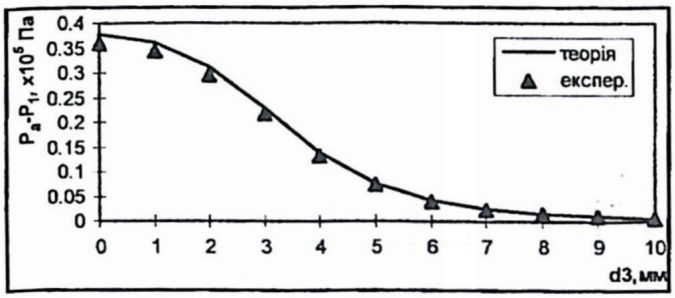

Рис. 3. Залежність розрідження P_a-P_1 від діаметра отвору у заготовці d_3 при d_2=0.036м, h_0=0.0002м та тиску P_0=400000Па

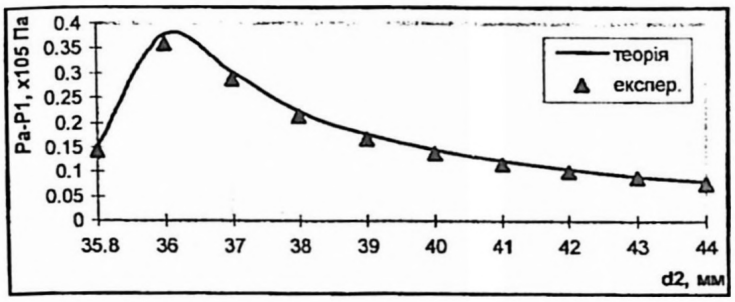

Рис. 4. Залежність розрідження P_a-P_1 від діаметру заготовки d_2 при h_0=0.0002м, d_3=0 та тиску P_0=400000Па

Summary. Pneumatic stream captures description and methods of determining are given. Theoretical dependence of captures parameters on working medium is defined.

Література

1. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник.- М.: Машиностроение, 1983.- 375 с.
2. Дейч М.Е. Техническая газодинамика.-М.: Энергия, 1974.-592 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. -М.: Машиностроение, 1975.-560 с.
4. Дмитриев В.Н., Градецкий В.Т. Основы пневмоавтоматики. -М.: Машиностроение, 1973.-360 с.
5. Усов Б.А., Проць Я.И. Выбор параметров струйных захватов для промышленных роботов и манипуляторов // Известия вузов. Машиностроение.- 1986.- №1.- С. 152-156.