

УДК 621.86

**Я.І. Проць, проф., канд. техн. наук, П.С. Федорів, асист., Ю.О. Цяпута, асп.**  
*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## Дослідження струменевих багатощілинних приводів захоплюючих пристроїв

Здійснено аналітичні та експериментальні дослідження силових характеристик багатощілинних ежекційних струменевих приводів механічних захоплюючих пристроїв. Досліджено раціональні конструктивні параметри струменевого привода для забезпечення необхідних зусиль захоплення об'єктів маніпулювання.

**струменевий пристрій, аеродинамічний ефект, ежекція, привід, захоплюючих пристрій, присмоктувальна сила, тягове зусилля приводу**

У роботизованих системах в якості виконавчих пристроїв широко використовуються захоплюючі пристрої з важільними передавальними механізмами. Для створення силових зусиль захоплювачів найчастіше застосовують різноманітні конструкції пневматичних приводів. Одним з перспективних видів пневмопривода є струменевий привід, який володіє високими динамічними характеристиками і простотою конструкції.

Дослідженням роботи та проектуванням механічних захоплюючих пристроїв займались ряд авторів [1, 2, 3]. Відомі праці [4, 5, 6], в яких досліджувалися вплив струменя повітря для створення ним силового зусилля, однак питання конструктивних рішень для забезпечення силових зусиль ще не достатньо обгрунтовані.

Аналіз силової дії струменевих елементів показує, що перспективним для приводів захоплюючих пристроїв є виконання на торці струменевого елемента кільцевої конічної щілини на власному торці під визначеним кутом  $\alpha$  до площини поршня. У порівнянні з вакуумними й електромагнітними, а також струменевими приводами з перпендикулярними соплами, даному пристрою властиві більш широкі технологічні можливості і переваги. У них більш високі силові характеристики, можуть працювати із різними площинами обтікання поршня, який може бути з вирізами, отворами, або нагрітим до визначеної температури.

Конструкція захоплюючого пристрою з струменевим ежекційним приводом (рис.1) містить корпус 1, у якому встановлена вставка 2 з конічною периферією, що утворює з фаскою отвору конуса на торці корпусу кільцеву конічну щілину, поршень 3, зв'язаний важільним передавальним механізмом із губками захоплювача 4. Захоплення заготовки відбувається за рахунок подачі у камеру струменевого елемента стиснутого повітря. Розкриття губок захоплювача здійснюється під дією пружини 5 після припинення подачі до привода стиснутого повітря.

При роботі привода кільцевий струмінь повітря, витікаючи під кутом  $\alpha$  до поверхні поршня в зазорі між торцями корпусу й поршня, утворює суцільний плоский радіальний потік. Цей потік викликає зниження тиску до величини нижче атмосферного  $P_a$ , що приводить до появи аеродинамічного ефекту. Характерними геометричними параметрами таких струменевих пристроїв є: радіус циліндричної конічної вставки  $r_0$ , радіус соплового елемента  $r_2$ , радіус камери  $r_k$ , висота щілини  $h_1$ ,

вимірювана в нормальному до її стінок напрямку, кут нахилу щілини  $\alpha$ . Відмінною рисою такого протікання є те, що в результаті сформованого щілиною і кільцевим суцільним витікаючим в атмосферу потоком газу на охопленій ним площині торця, тобто торця вставки 2, за рахунок ежекції утвориться знижений тиск, розрідження  $P_p$ .

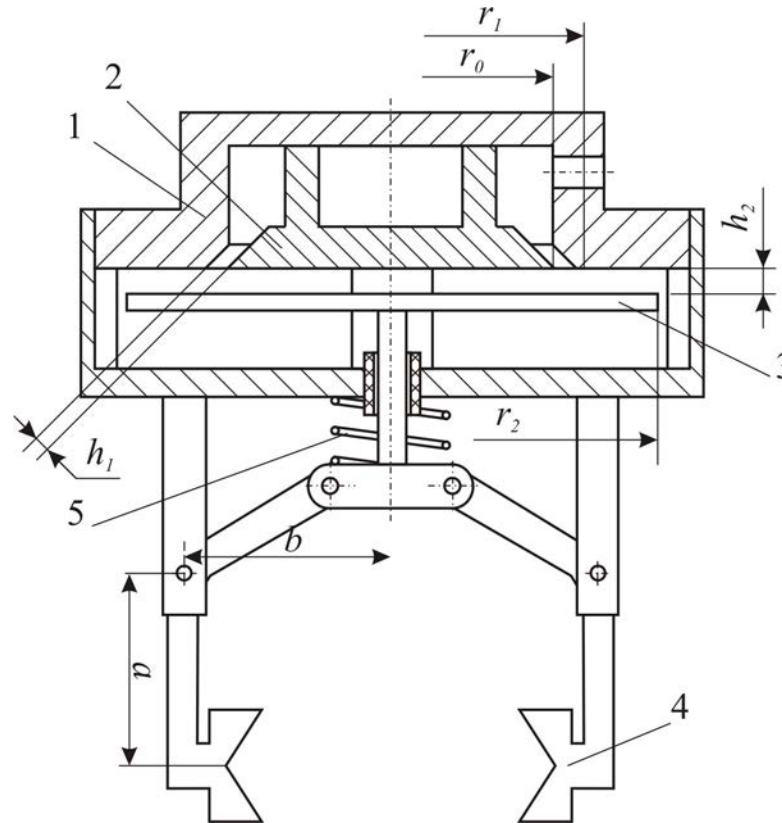


Рисунок 1 – Силевий структурний елемент із кільцевою концентричною щілиною

При розподілі швидкостей у зазорі  $h_{i1}$  варто розрізнити дві ділянки протікання повітря: ділянка формування профілю швидкостей на виході з щілини і ділянка плинності плоского радіального потоку зі сталим профілем швидкостей. Характер формування профілю швидкостей на початковому рівні залежить від геометричних параметрів кільцевої щілини.

Ідеалізуючи процес руху газу між торцем силового елемента й поверхнею поршня (зазор  $h_2$ ) приймаємо його ламінарним, стабілізуючим, нестиснутим плоским потоком між двома паралельними стінками. Градієнт швидкості і тиску на товщині зазору дорівнюють нулю, а товщина повітряної подушки  $h_n = \text{const}$  величина постійна і не залежить від підвідного тиску  $P_m$ . Величина тиску  $P$  в будь-якому перетині суцільного потоку газу, перпендикулярному швидкості потоку, однакова і залежить тільки від радіуса  $r$ , а швидкість потоку змінюється тільки по висоті  $h_n$  повітряної подушки. Крім цього, протікання відбувається без обміну енергії між потоком і зовнішнім середовищем, тобто на виході в зазор  $h$  відбувається повне адіабатичне розширення газу до величини атмосферного тиску  $P_a$  на виході. Однак плин газу на кінцевій ділянці сопла, де напрямок потоку повітря може бути перпендикулярним, паралельним чи спрямованим під кутом до зазору  $h_2$ , і в самому зазорі  $h_2$  між торцем

струменевого елемента і поверхнею поршня супроводжується складними фізичними явищами і вимагає особливого аналізу.

Ефективність струменевого силового пристрою з кільцевою щілиною на торці залежить від оптимального співвідношення між зазором  $h_2$  і товщиною  $h_1$  конічної щілини, яка вимірюється в нормальному до поверхні фасок напрямку і максимальна сила присмоктування поршня  $F_{np}$  (до 250-300 Н) забезпечується при  $h_2/h_1=2,8...3,2$  і куті нахилу щілини  $\alpha=120...150^\circ$ . Для стійкої роботи струменевих приводів рекомендується магістральний тиск  $(18,62-49,05) \cdot 10^4$  Па.

Більш досконалішими з погляду маніпулювання силою затиску захоплюючих пристроїв, тобто розширення технологічних можливостей, є конструкція багатокільцевого струменевого привода, показаного на рис.2. Вона містить корпус 1, на торцевій поверхні якого концентрично, із зазором один відносно одного, закріпленні тарілки 2, 3, 4, які утворюють циліндричні камери 5, 6 і 7, а верхні торці тарілки лежать в одній площині й утворюють робочий торець силового елемента.

Конічними периферіями і внутрішніми фасками тарілок на робочому торці силового елемента утворюються концентричні кільцеві щілини 8, 9 і 10 радіусами відповідно  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ ,  $r_{03}$ .

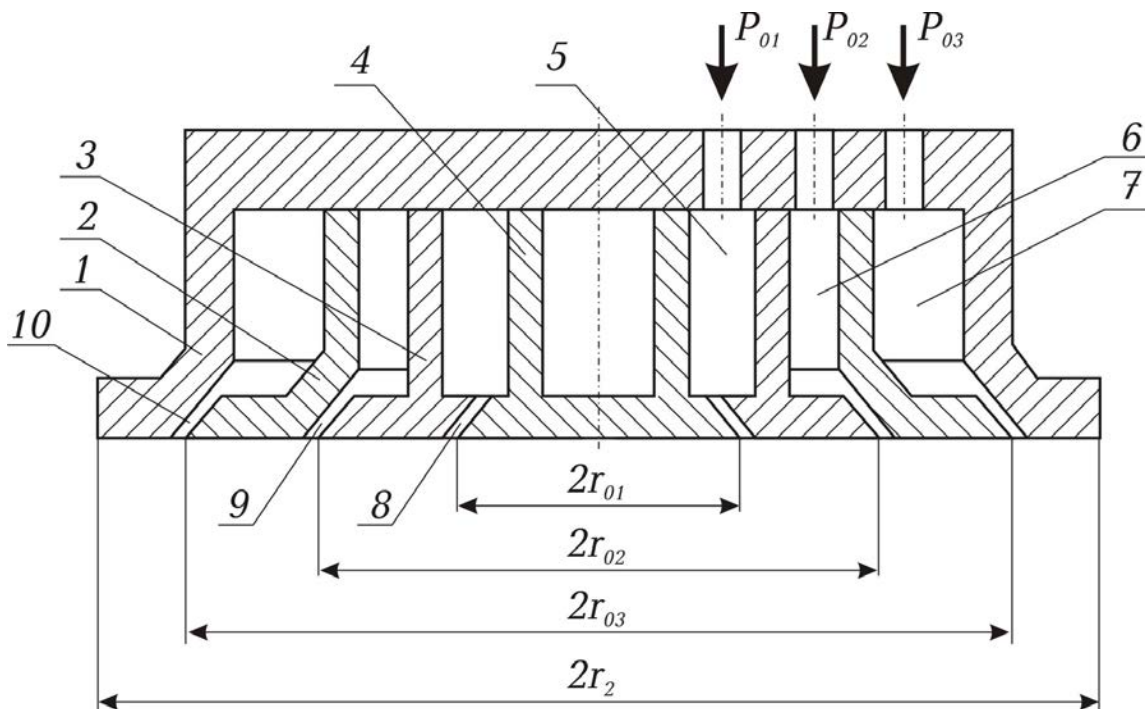


Рисунок 2 – Розрахункова схема багатокільцевого струменевого елемента

Принцип роботи струменевого багатокільцевого привода полягає в подачі стиснутого повітря через повітряпідвідні канали послідовно до кожної або паралельно до декількох, або всіх відразу циліндричних щілин.

Розглянемо послідовне включення, коли стиснене повітря надходить спочатку до однієї камери і витікає крізь відповідну їй кільцеву щілину в атмосферу. Силу характеристику струменевого привода з радіусами конічної щілини  $r_{01}$  і периферії  $r_2$  можна визначити за формулою

$$F_{np} = \int_{r_0}^{r_2} (P_a - P) \cdot 2\pi r dr, \quad (1)$$

де сила присмоктування поршня  $F_{np}$  залежить від величини виникаючого на торці тарілки вакууму  $P_p$  і зниження тиску від швидкісного напору потоку повітря на кільцевій ділянці, що охоплює кільцеву щілину, тобто в інтервалі радіусів від  $r_{01}$  до  $r_2$ . При подачі стиснутого повітря в другу камеру і витікання його вже другою щілиною радіусом  $r_{02}$ , сила присмоктування визначиться за тією ж формулою (1), тільки з підстановкою конструктивних параметрів іншої щілини. Величина цієї сили збільшиться, оскільки її основна складова від виниклого внаслідок ежекції на торці тарілки вакууму  $P_p$  прямо пропорційна площі цього торця.

Включення струменевих силових елементів з радіусами конічних щілин рівними  $r_{03}$ ,  $r_{04}$  і т.д. приводить до послідовного збільшення аеродинамічних характеристик притягування поршня. На підставі аналізу формулу сили притягування поршня при одинарно включених силових елементах у загальному виді можна представити наступним виразом

$$F_{np} = \pi V_{0i}^2 \rho_a r_{0i} \left( \frac{r_2 \ln \frac{r_2}{r_{0i}} - r_2 + r_{0i}}{r_2 - r_{0i}} + 0,5 - \frac{h_2}{r_{0i}} \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (2)$$

де  $V_{0i}$  - швидкість витікання струменя з  $i$ -тої кільцевої конічної щілини;

$r_{0i}$  - радіус конічної тарілки  $i$ -тої кільцевої щілини.

Розглянемо випадок паралельного включення, коли стиснуте повітря від джерела надходить одночасно в камери 5, 6, 7 (рис.2) і потім витікає крізь відповідні їм кільцеві конічні щілини 8, 9 і 10 в атмосферу. На кожній з кільцевій ділянці зазору  $h_2$ , починаючи з другого радіуса  $r_{02}$ , відбудеться взаємодія двох неоднорідних потоків, з яких першим є кільцевий суцільний, паралельний торцю потік газу в зазорі  $h_2$  а другим – витікаючий із щілини та діючий відносно першого під кутом  $\frac{\alpha}{2}$ , рівним половині кута нахилу конічної щілини. Напрямок потоку після злиття формується зазором  $h_2$ . Однак швидкість мас потоків, що злилися, дещо міняється і на ділянках змішування можна визначити виходячи з кількості руху мас [4]. Величина рівнодіючої потоку в цьому випадку виразиться формулою

$$m_1 V_{01} + m_2 V_{02} \sin \frac{\alpha}{2} + \dots + m_i V_{0i} \sin \frac{\alpha}{2} = (m_2 + m_3 + \dots + m_i) V_i \sin \frac{\alpha}{2} + m_1 V_{01} \quad (3)$$

де  $m_1 \dots m_i$  - маси стиснутого повітря витікаючого з конічних щілин;

$V_{01} \dots V_{0i}$  - швидкості витікання повітря з цих щілин при тисках  $P_{01} \dots P_{0i}$ ,  $V_i$  - швидкість змішаного струменя повітря на кожній з ділянок, що з деякими допущеннями в загальному вигляді для  $i$ -ї ділянки можна записати як

$$V_i = \frac{m_1 V_{01} + \sin \frac{\alpha}{2} \sum_{i=2}^k m_i V_{0i}}{\sum_{i=1}^k m_i} . \quad (4)$$

Для визначення маси повітря, що протікає за одиницю часу  $dt$  через зазор  $dh$ , скористаємося відомим рівнянням стану Менделєєва-Клапейрона, що зв'язує між собою основні параметри потоків газу всіх ділянок.

$$P_{0i} V_i = \frac{m_i}{\mu_i} RT , \quad (5)$$

Тут  $V_i$  - елементарний об'єм повітря на  $i$ -тій ділянці. У результаті перетворень загальна формула (4) для визначення величини швидкості результуючого струменя на будь-якій ділянці змішування представиться виразом

$$V_i = \frac{P_{01} V_{01}^2 + \sin \frac{\alpha}{2} \sum_{i=2}^k P_{0i} V_{0i}^2}{\sum_{i=1}^k P_{0i} V_{0i}} . \quad (6)$$

Замітимо, що в тому випадку, коли на торці силового елемента базується кільцеподібний поршень з внутрішнім діаметром кільця меншим діаметра першої конічної щілини  $r_1$  змішування двох потоків (витікаючого з першої щілини і засмоктуючого через отвір поршня внаслідок ежекції) відбудеться уже на першій ділянці від  $r_{01}$  до  $r_{02}$ . Швидкість на цій ділянці визначиться згідно формули (6) з урахуванням перепаду тиску  $\Delta P \approx P_1$ . Якщо припустити, що вхідний тиск на крайці кожної щілини дорівнює магістральному тиску, тобто  $P_{01} = P_{02} = \dots = P_{0k} = P_m$ , а також допустити, що при однакових конструктивних параметрах ( $h_1, h_2, y, \alpha$  і ін.) швидкість витікання з щілин буде дорівнює  $V_0$ , тобто  $V_{01} = V_{02} = \dots = V_{0k} = V_0$  то швидкість результуючого струменя  $V_i$  можна прийняти малоизмінним щодо середнього значення швидкості  $V_0$  і рівною

$$V_i = K_{cm} \cdot V_0 , \quad (7)$$

де  $K_{cm}$  - коефіцієнт пропорційності, що визначається як

$$K_{cm} = \frac{1 + (N_1 - 1) \sin \frac{\alpha}{2}}{N_1} , \quad (8)$$

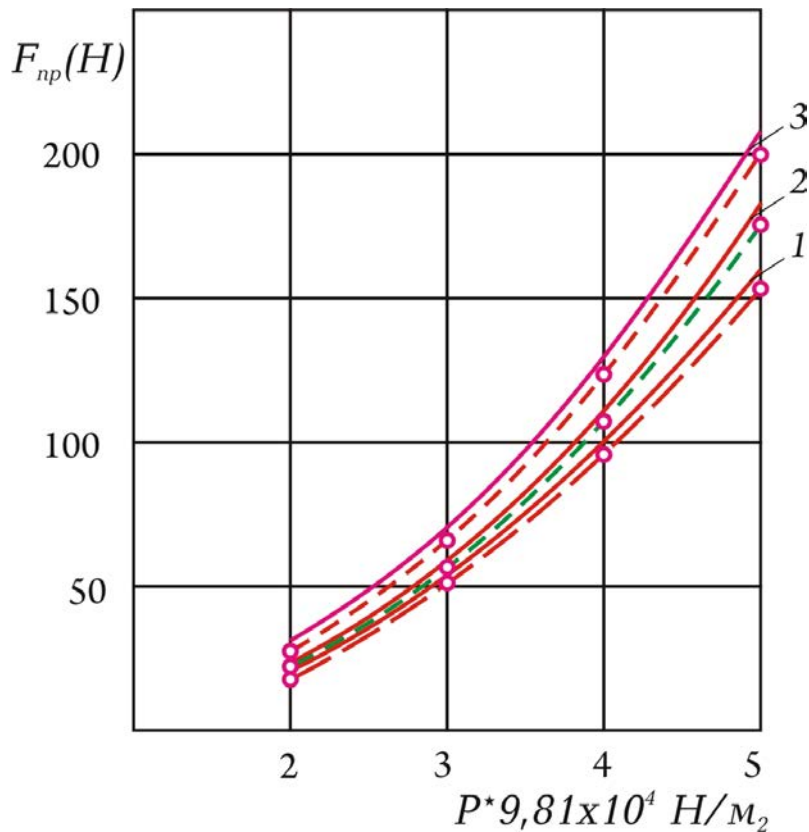
де  $N_1$  - повне число кільцевих конічних щілин, яке визначається з урахуванням варіанта, і рівне цілому числу  $N_1=1,2,3\dots$ . Теоретичні й експериментальні дослідження показують, що коефіцієнт  $K_{cm}$  можна прийняти рівним 0,95-0,97 при  $\alpha=150^\circ$ .

У результаті сила присмоктування багатокільцевого приводу представиться сумою від зусилля присмоктування підрахованого формулою (2) для першого

(внутрішнього) кільцевого силового елемента і сумуючого зусилля присмоктування, підрахованого для кожного наступного силового елемента, на ділянці якого відбувається змішування струминевих потоків повітря. Формула цієї сили буде мати вигляд:

$$F_{np} = \pi \rho_a \left[ V_{01}^2 r_{01} \left( \frac{r_{02} \ln \frac{r_{02}}{r_{01}} - r_{02} - r_{01}}{r_{02} - r_{01}} + 0,5 - \frac{h_2}{r_{01}} \cos \frac{\alpha}{2} \right) + \sum_{i=2}^k V_i^2 r_{0i}^2 \left( \frac{r_{0i+1} \ln \frac{r_{0i+1}}{r_{0i}} - r_{0i+1} + r_{0i}}{r_{0i+1} - r_{0i}} - \frac{h_2}{r_{0i}} \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (9)$$

де  $r_{0i}$  - радіус  $i$ -ої кільцевої конічної щілини,  $r_{0i+1}$  - радіус наступної після  $i$ -ої щілини.



суцільні лінії – розрахункові, пунктирні – експериментальні; криві 1 і 2 отримані при послідовному підключенні силових струминевих, крива 3 – при одночасному.

Рисунок 3 – Залежність сили привода  $F_{np}$  від тиску живлення  $P_m$ :

При теоретичним розрахункам використовувалися такі значення параметрів:  $\rho_a=1,225$  кг/м<sup>3</sup>,  $n=1,41$ ,  $R=287$  Н·м/(кг·град),  $T=293^0$ . На рис.3 показані силові залежності  $F_{np}=f(P)$  для двох приводів із геометричними параметрами  $2r_{01}=40$  мм,  $2r_{02}=60$  мм,  $2r_2=100$  мм,  $h_1=0,1$  мм,  $\alpha=150^0$ . Криві 1 і 2 представляють залежності окремо

включених, а крива 3 характеризує силові зусилля одночасно включених кільцевих струменевих елементів. Незначне зменшення до 5% експериментальних даних відносно теоретичних вказує на наявність сил тертя між поверхнями потоку і щілин.

Розглянуті приводи прості у виготовленні й в експлуатації, той самий силовий елемент може використовуватися для різних за розмірами, матеріалом і конфігурації поршнів. Силові елементи мають зручне живлення у виробничих умовах і низьку собівартість як виготовлення так і обслуговування.

## Список літератури

1. Градецкий В. Г. Работы вертикального перемещения / В. Г. Градецкий, М. Ю. Рачков.- М.: Тип. Мин. Образования РФ, 1997. — 223 с.
2. Колпашников С. Н., Методы расчета характеристик схватов роботов. Промышленные роботы на погрузочно-разгрузочных работах/ С. Н. Колпашников, И. Б. Челпанов.- Л.: Изд-во ЛДНТП, 1984. — с. 52—56.
3. Челпанов И. Б. Схваты промышленных роботов/ И.Б. Челпанов, С.Н. Колпашников — Л.:Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. — 287 с.
4. Дмитриев В.Н. Основы пневмоавтоматики/ В.Н. Дмитриев, В.Т. Градецкий. — М.: Машиностроение, 1973. — 360с.
5. Сентяков Б.А. Исследование силовых характеристик струйного вихревого преобразователя/ Б.А. Сентяков, Г.П. Исупов. — М.: Измерительная техника. — 1984. — № 1. — С. 34
6. Проць Я., Савків В., Федорів П. Струменеві захоплюючі пристрої промислових роботів // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. — 1998. — том 3, число 1. — С. 44-48

*Я. Проць, П. Федорів, Ю. Цяпута*

### **Исследование струйных многощелевых приводов хватных устройств**

Осуществлены аналитические и экспериментальные исследования силовых характеристик многощелевых эжекционных струйных приводов механических захватывающих устройств. Исследованы рациональные конструктивные параметры струйного привода для обеспечения необходимых усилий захвата объектов манипулирования.

*Y. Prots, P. Fedoriv, Y. Tsiaputa*

### **Investigation of multislot air-jet actuators of gripping devices**

Analytical and experimental investigations of force characteristics of multislot ejecting air-jet actuators of mechanical grippers were done. Rational design parameters of air-jet drive for provision with the necessary efforts to grab objects of manipulation were researched.

Одержано 20.03.12