

**СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЗАПІРНО-ВРІВНОВАЖУЮЧОГО
ПРИСТРОЮ РОТОРА БАГАТОСТУПІНЧАТОГО
ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА**

І. В. Павленко, асистент,
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна
E-mail: pavlenko@omdm.sumdu.edu.ua

У роботі викладена методика статичного розрахунку запірно-врівноважуючого пристрою ротора багатоступінчатого відцентрового компресора на основі створеної математичної моделі, що визначає осьову рівновагу ротора і витoki через дроселі гідравлічного тракту.

Ключові слова: відцентровий компресор, торцевий дросель, регулятор перепаду тиску, осьова сила, статичні характеристики.

ВСТУП

Для врівноваження осьових сил, що діють на ротор багатоступінчатих відцентрових компресорів, переважно застосовуються розвантажувальні поршні. При цьому витoki робочого середовища обмежуються кінцевими ущільненнями, а залишкова осьова сила сприймається упорними підшипниками. Така конструкція призводить до ускладнення системи осьового врівноваження ротора, зменшення її надійності й економічності.

У роботах [1, 5] запропоновано принципово нову конструкцію пристрою осьового врівноваження – запірно-врівноважуючий пристрій (ЗВП) ротора відцентрового компресора, що одночасно виконує функції кінцевого ущільнення і радіально-упорного гідростатичного підшипника. У роботі [6] наведена спрощена методика розрахунку конструкції ЗВП для ламінарного режиму руху середовища у шпаринних ущільненнях. Результати цих робіт потребують доповнень, пов'язаних з урахуванням турбулентного режиму руху газу і наявності у конструкції регулятора перепаду тиску (РПТ) для забезпечення незмінної різниці тиску запірного і робочого середовищ.

Проблема статичного розрахунку ЗВП є важливою для забезпечення надійності швидкохідних високонапірних відцентрових компресорів. Цей розрахунок зводиться до визначення статичних і витратних характеристик та вибору параметрів, що забезпечують необхідні значення регульованих величин у заданому діапазоні зміни тиску нагнітання.

В даній роботі викладена методика статичного розрахунку ЗВП ротора багатоступінчатого відцентрового компресора з РПТ на основі створеної математичної моделі.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Принцип роботи пристрою

Схема ЗВП наведена на рис. 1.

Принцип роботи пристрою такий. Осьова сила T , що діє на ротор компресора, сприймається розвантажувальним диском 1. До порожнини 3 між втулковим і торцевим ущільненнями через дросель 5 підводиться запірне середовище. Функцію зовнішнього дроселя виконує додаткове втулке ущільнення 7. Тиск у порожнинах 3 і 6 залежить від величини торцевого зазору z . Випадкове зменшення осьової сили T , що діє на ротор, призводить до збільшення торцевого зазору z . При цьому тиск p_2 у порожнині 3 зменшується, тиск p_3 у порожнині 6 – збільшується. У результаті зменшення p_2 перепад тиску $(p_e - p_2)$ на вихідному дроселі

регулятора збільшується, що призводить до збільшення витрат запірного середовища, необхідного для запобігання витоків робочого середовища через циліндричний дросель 2. Одночасно з цим, величина розвантажувальної сили F зменшується, і ротор повертається у початкове положення. У разі збільшення осьової сили торцевий зазор z , перепад тиску ($p_e - p_2$) на вихідному дроселі регулятора і витрати запірного середовища зменшуються. Зрештою, ротор приймає положення, що відповідає умові осьової рівноваги.

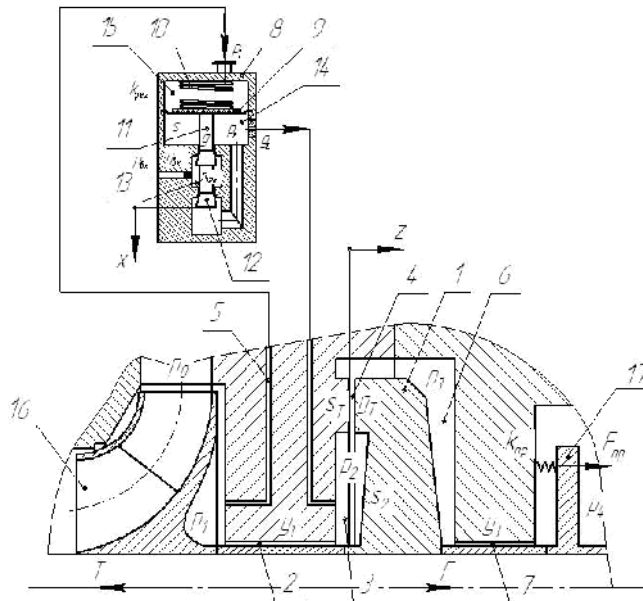


Рисунок 1 – Схема запірно-рівноважуючого пристрою ротора багатоступінчатого відцентрового компресора з регулятором перепаду тиску: 1 – розвантажувальний диск; 2, 7 – циліндричні дроселі; 3 – камера ЗВП; 4 – торцевий дросель; 5 – відвод у надмембранну камеру; 6 – порожнина за розвантажувальним диском; 8 – корпус РПТ; 9 – мембрана; 10 – пружний елемент; 11 – шток; 12 – сідло; 13 – вхідна камера РПТ; 14, 15 – мембранні камери; 16 – робоче колесо останньої ступені компресора; 17 – віджимний пристрій

Для запобігання витоків робочого середовища в атмосферу необхідно підтримувати перевищення тиску запірного середовища p_e над тиском нагнітання p_1 . Для цього до конструкції ЗВП має містити регулятор перепаду тиску. Регулятор містить корпус 8, у якому розміщені мембранний привід 9, пружина 10, шток 11, а також дроселюючий орган, що містить двосідельний затвор 12. Вхідний тиск p_{ex} дроселюється до тиску $p_{кам}$ у камері 13. Запірне середовище з тиском p_e , що дорівнює запірному тиску у підмембранній порожнині 14, подається через дросель у камеру 3. Надмембранна камера 15 сполучена з порожниною компресора за останнім робочим колесом 16.

Принцип роботи РПТ такий. При збільшенні тиску p_1 сумарний тиск, що діє на мембрану 9, збільшується, і затвор 12 відкривається, збільшуючи свою провідність. Як наслідок, тиск p_e у підмембранній камері 14 збільшується, і на нижній площині мембрани створюється зусилля, що компенсує силу тиску на верхню площину мембрани. Перевищення тиску у камері 15 над тиском у камері 14 залишається

незмінним і дорівнює $p = p_e - p_1$. Величина цього перепаду встановлюється зусиллям деформації пружного елемента 10.

Таким чином, ЗВП ротора багатоступінчатого відцентрового компресора із РПТ є системою автоматичного регулювання, для якої торцевий зазор z і витрати запірного середовища є регульованими величинами; осьова сила тиску на розвантажувальний диск F – регулююча дія; осьова сила T , що діє на ротор, і перевищення запірного тиску над тиском нагнітання $p = p_e - p_1$, а також загальний перепад тиску на врівноважуючий пристрій $p = p_1 - p_4$ є зовнішньою дією.

2. Статичний розрахунок

2.1. Загальні зауваження

Статичний розрахунок ЗВП дозволяє на стадії проектування обирати геометричні параметри так, щоб у заданому діапазоні зміни сумарної осьової сили, що діє на ротор компресора, торцевий зазор і витрати робочого середовища знаходились у заданих межах. Крім того, стаціонарні значення фізичних параметрів, визначені у результаті статичного розрахунку, застосовуються для аналізу динаміки ЗВП.

Статичний розрахунок заснований на розв'язанні системи рівнянь осьової рівноваги ротора компресора і штока РПТ, а також рівнянь балансів витрат через дроселі гідравлічного тракту (рис. 2):

$$\begin{cases} T = F + F_{np}; s(p_e - p_1) = F_{рег}; \\ Q_{вх} = Q_{кам}; Q_{кам} = Q_e; Q_e = Q_1 + Q_T; Q_T = Q_3, \end{cases} \quad (1)$$

де T – сумарна осьова сила, що діє на ротор; F_{np} , $F_{рег}$ – зусилля попередньої деформації пружного елемента і віджимного пристрою; $F = s_e(p_2 - p_3)$ – розвантажувальна сила, що виникає у торцевому дроселі; $s_e = s_2 + 0,5s_T$ – ефективна площа; s_2 – площа під торцевим дроселем; s_T – площа торцевого дроселя; s – площа робочої поверхні мембрани; $Q_{вх}$ – витрати газу через вхідний дросель РПТ; $Q_{кам}$ – витрати через зазор, утворений між затвором і корпусом РПТ; Q_e – витрати запірного середовища, що надходить у камеру ЗВП; Q_1 , Q_3 , Q_T – витрати газу через вхідний і вихідний циліндричні дроселі та через торцевий зазор.

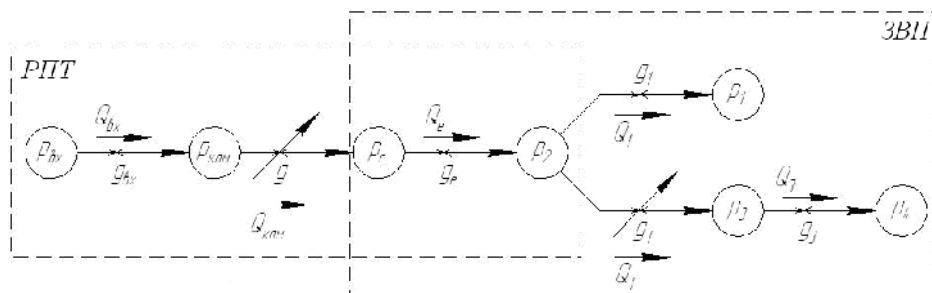


Рисунок 2 – Схема гідравлічного тракту

2.2. Витрати газу через дроселі

Для визначення виразів для витрат розглянемо рух газу у шпаринному ущільненні, розрахункова схема якого наведена на рис. 3. Вхідний і вихідний тиски відповідно p_{in} і p_{out} ; перепад тиску $p = p_{in} - p_{out}$; витрати газу Q ; геометричні розміри: довжина l , радіус r , зазор h .

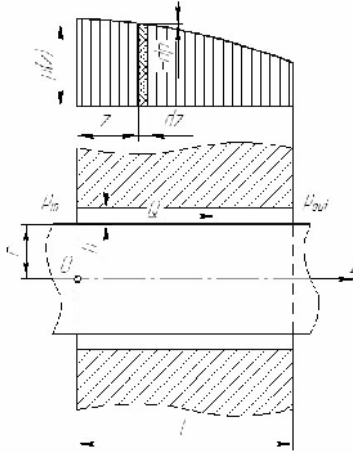


Рисунок 3 – Розрахункова схема

З точки зору гідравлічного розрахунку розрізняють такі випадки руху газу:

а) з незначним відносним перепадом тиску ($p/p_{in} \ll 1$), коли стисканням газу можна знехтувати;

б) зі значним відносним перепадом тиску ($p/p_{in} > 0,1$), коли необхідно враховувати стискання газу.

Від відношення p/p_{in} залежить розрахункова залежність для витрат газу через дросель [3, 4]. Так, наприклад, для $p/p_{in} < 0,1$ неврахування стискання газу призводить до похибки, що не перевищує 5 %.

Елементарний приріст тиску dp на ділянці дроселя довжиною dz дорівнює узятим зі знаком «-» елементарним втратам тиску. Для переважаючої напірної течії за формулою Дарсі-Вейсбаха

$$dp = -\frac{\lambda dz}{2h} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

де ρ – густина газу; $V = Q/f$ – середня у поперечному перерізі швидкість потоку, що визначається як відношення витрат Q до площі поперечного перерізу $f = 2rh$; λ – коефіцієнт гідравлічних втрат на тертя по довжині.

Процес зміни стану газу у шпаринному ущільненні з достатньою для розрахунків точністю можна вважати ізотермічним [2]. У цьому випадку коефіцієнт не змінюється по довжині дроселя.

У першому випадку, коли стисканням газу можна знехтувати ($V = const$) середня швидкість V потоку залишається незмінною по довжині l при фіксованому значенні витрат Q . Шляхом інтегрування рівняння (2) знаходимо

$$\Delta p = \frac{\lambda l}{2h} \frac{\rho V^2}{2} = \zeta \frac{\rho Q^2}{2f^2}, \quad (3)$$

де $\zeta = \lambda l / (2h)$ – коефіцієнт гідравлічних втрат.

Коефіцієнт визначається за формулою Блазіуса

$$\lambda = \frac{C}{Re^n} \quad (4)$$

і залежить від числа Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot 2h}{\nu} = \frac{2h}{f\nu} Q = \frac{Q}{\pi r \nu}, \quad (5)$$

а також параметрів C , n , які також залежать від режиму руху [8] (таблиця 1), тому витрати газу через шпаринне ущільнення визначаються по-різному в залежності від режиму руху.

Таблиця 1 – Параметри формули Блазіуса

Режим руху течії:	Ламінарний	Турбулентний	Автомодельний
Число Рейнольдса:	< 1200	> 1200	$\sim 10^5 \dots 10^7$
Коефіцієнт C :	96	0,307	0,06
Показник n :	1	0,24	0

Для ламінарного режиму руху, коли $C = 96/Re$, формула (3) набуває вигляду:

$$\Delta p = \frac{\lambda l}{2h} \frac{\rho V^2}{2} = \frac{6\mu l}{\pi r h^3} Q, \quad (6)$$

звідки витрати

$$Q = g_{1*} \Delta p \quad (7)$$

пропорційні перепаду тиску, а коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт провідності)

$$g_{1*} = \frac{\pi r h^3}{6\mu l}. \quad (8)$$

Для автотомодельної області турбулентної течії, коли $C = 0,06$ не залежить від числа Рейнольдса, за формулою (3) отримуємо витрати

$$Q = g_{2*} \sqrt{\Delta p}, \quad (9)$$

пропорційні квадратному кореню з перепаду тиску, а провідність

$$g_{2*} = \sqrt{\frac{2f^2}{\rho \zeta}}. \quad (10)$$

У другому випадку, який відповідає значному відносному перепаду тиску, рух газу у дроселі супроводжується зменшенням густини і збільшенням середньої швидкості при заданих витратах. Для інтегрування диференціального рівняння (2), що містить 3 функції від параметра z (тиск, густина, середня швидкість), його необхідно доповнити двома рівняннями. Перше з них – закон збереження маси:

$$\dot{m} = \rho Q = \text{const}. \quad (11)$$

Прирівнюючи масові витрати газу у початковому і поточному перерізах

$$\rho_{in} V_{in} f = \rho V f, \quad (12)$$

визначаємо залежність середньої швидкості від густини газу:

$$V = \frac{\rho_{in}}{\rho} V_{in}, \quad (13)$$

де ρ_{in} – густина газу на вході.

Рівняння (2) з урахуванням залежності (13) набуває вигляду:

$$dp = -\frac{\lambda dz}{2h} \frac{\rho_{in}^2 V_{in}^2}{2\rho}. \quad (14)$$

Отримане рівняння замикається рівнянням стану

$$\frac{pV}{T} = R \quad \text{або} \quad \frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M}, \quad (15)$$

де V – об'єм, M – молярна маса газу; R – універсальна газова константа; T – температура газу за шкалою Кельвіна. Виражаючи густину газу через тиск

$$\rho_{in} = \frac{p_{in}M}{RT}; \quad \rho = \frac{pM}{RT}, \quad (16)$$

рівняння (14) перетворюється до вигляду:

$$pdp = -\frac{\lambda dz}{2h} \frac{p_{in}^2 V_{in}^2}{2RT/M}. \quad (17)$$

Шляхом інтегрування лівої частини по параметру p і правої – по z , отримаємо

$$\frac{p_{in}^2 - p_{out}^2}{2} = \frac{\lambda l}{2h} \frac{p_{in}^2}{RT/M} \frac{V_{in}^2}{2}, \quad (18)$$

або з урахуванням (16)

$$\frac{p_{in}^2 - p_{out}^2}{2p_{in}} = \frac{\lambda l}{2h} \frac{\rho_{in} V_{in}^2}{2}. \quad (19)$$

Приведемо отримане рівняння до нормальних параметрів (тиск p_n , густина ρ_n , середня швидкість V_n , витрати Q_n). Із застосуванням рівняння стану

$$\frac{p_{in}}{\rho_{in}} = \frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M} \quad (20)$$

і закону збереження маси

$$\rho_{in} V_{in} = \rho_n V_n = \rho_n \frac{Q_n}{f} \quad (21)$$

рівняння (19) перетворюється до вигляду:

$$\frac{p_{in}^2 - p_{out}^2}{2p_n} = \frac{\lambda l}{2h} \frac{\rho Q^2}{2f^2}. \quad (22)$$

Для ламінарного режиму руху, коли $Re = 96/Re$, формула (22) набуває вигляду

$$\frac{p_{in}^2 - p_{out}^2}{2p_n} = \frac{6\mu l}{\pi r h^3} Q, \quad (23)$$

звідки витрати

$$Q = g_{3*} (p_{in}^2 - p_{out}^2) \quad (24)$$

пропорційні різниці квадратів тисків, а коефіцієнт провідності

$$g_{3*} = \frac{1}{2p_n} \frac{\pi r h^3}{6\mu l} = \frac{g_{1*}}{2p_n}. \quad (25)$$

Для автомоделної області турбулентної течії, коли не залежить від числа Рейнольдса, за формулою (22) отримаємо витрати

$$Q = g_{4*} \sqrt{p_{in}^2 - p_{out}^2}, \quad (26)$$

пропорційні квадратному кореню з різниці квадратів тисків, а коефіцієнт провідності

$$g_{4*} = \sqrt{\frac{1}{2p_n} \frac{2f^2}{\rho \zeta}} = \sqrt{\frac{g_{2*}^2}{2p_n}}. \quad (27)$$

Результати розрахунків зведені до таблиці 2.

Таблиця 2 – Вирази для витрат газу через дроселі

Перепад тиску	Режим руху газу	Витрати	Коефіцієнт провідності
$p \ll p_{in}$	Ламінарний	$Q = g_{1*} \Delta p$	$g_{1*} = \frac{\pi r h^3}{6\mu l}, \text{ м}^3 / (\text{Па}\cdot\text{с})$
		$Q = g_{2*} \sqrt{\Delta p}$	$g_{2*} = \sqrt{\frac{2f^2}{\rho \zeta}}, \text{ м}^3 / (\text{Па}^{0.5}\cdot\text{с})$
$p > 0,1 p_{in}$		$Q = g_{3*} (p_{in}^2 - p_{out}^2)$	$g_{3*} = \frac{g_{1*}}{2p_n}, \text{ м}^3 / (\text{Па}^2\cdot\text{с})$
		$Q = g_{4*} \sqrt{p_{in}^2 - p_{out}^2}$	$g_{4*} = \sqrt{\frac{g_{2*}^2}{2p_n}}, \text{ м}^3 / (\text{Па}\cdot\text{с})$

Re,

Re.

(5)

$$Q = \frac{fv}{2h} Re \quad (28)$$

(22),

(4),
(1).

C n
(22)
Re

$$\phi(Re) = \frac{2p_u}{p_{in}^2 - p_{out}^2} \frac{\mu^2 l}{16\rho h^3} \frac{C(Re)}{Re^{2-n(Re)}} = 1, \quad (29)$$

(. 4).

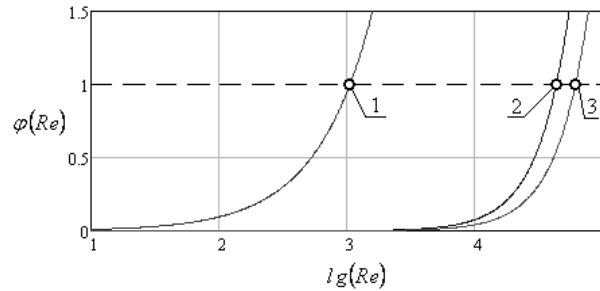


Рисунок 4 – Визначення чисел Рейнольдса у внутрішньому (1) і додатковому (3) циліндричних та торцевому (2) дроселях

$$p_1 < p_2 < 1,1p_1 \quad (p_2 - p_1) \ll p_2, \quad Re_1 \sim 10^3 \quad (. 4), \quad Q_1$$

$$(p_2 - p_1).$$

$$(p_2 - p_3) > 0,1p_2; (p_3 - p_4) > 0,1p_3, \quad p_1, \quad (p_2^2 - p_3^2)^{0,5}$$

$$(. 4) \quad Re \sim 10^4 \dots 10^5, \quad Q_T, Q_3$$

$$(p_3^2 - p_4^2)^{0,5}.$$

$$(p_{вх} - p_{кам}) \quad Q_{вх}$$

$$: (p_{кам} - p_e) > 0,1p_{кам}; \quad (p_{кам}^2 - p_e^2)^{0,5} \quad Q_{кам}$$

$$(p_e - p_2)$$

$$p_e \sim p_1, \quad Q_e \quad (p_e - p_2).$$

$$Q_{вх} = g_{вх} (p_{вх} - p_{кам}); \quad Q_{кам} = g \sqrt{p_{кам}^2 - p_e^2}; \quad Q_e = g_e (p_e - p_2); \quad (30)$$

$$Q_1 = g_1 (p_2 - p_1); \quad Q_T = g_T \sqrt{p_2^2 - p_3^2}; \quad Q_3 = g_3 \sqrt{p_3^2 - p_4^2};$$

$$g_{вх}, g_e, g - \quad ; g_1, g_3, g_T = g_{TB} -$$

$$; g_B, g_{TB} -$$

$$p_e - \quad x, z; p_1 - \quad ; p_{вх} - \quad x_B, z_B$$

$$; p_{кам}, p_2, p_3 - \quad ; p_4 -$$

2.3. Розв'язання системи рівнянь статичного розрахунку
2.3.1. Загальний випадок

g, g_T

$$g = g_B (x/x_B)^{1,5}, \quad g_T = g_{TB} (z/z_B)^{1,5}.$$

$$\begin{aligned}
 &= T/(p_B s_B) = b \quad 1; \\
 &= F_{np}/(p_B s_B) \quad \text{рег} = F_{рег}/(p_B s_B); \quad = s_e/s_B, \\
 &_m = s/s_B; \quad u = z/z_B, \quad x/z_B; \quad \text{вх1,e1,ТВ1,31} = g_{вх,e,ТВ,3} / g_1, \\
 &_{B1} = g / g_1, \quad Q_{вх,кам,e,1,T,3} = Q_{вх,кам,e,1,T,3} / Q_{ТВ}. \quad p_B - \\
 &_{p_H}; \quad s_B = T_H/p_H - \\
 &_{T_H} \quad b = T/(p_H s_B) \quad 1 - \\
 &_{Q_{ТВ}} - \quad z = z_B. \\
 & \quad \quad \quad (30) \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases}
 \sigma(\psi_2 - \psi_3) = b\psi_1 - \chi; \\
 \alpha_{e1}(\psi_e - \psi_2) = \psi_2 - \psi_1 + \alpha_{ТВ1} u^{3/2} \sqrt{\psi_2^2 - \psi_3^2}; \\
 \alpha_{ТВ1} u^{3/2} \sqrt{\psi_2^2 - \psi_3^2} = \alpha_{31} \sqrt{\psi_3^2 - \psi_4^2}; \\
 \sigma_m(\psi_e - \psi_1) = \chi_{рег}; \\
 \alpha_{вх1}(\psi_{вх} - \psi_{кам}) = \alpha_{B1} \xi^{3/2} \sqrt{\psi_{кам}^2 - \psi_e^2}; \\
 \alpha_{B1} \xi^{3/2} \sqrt{\psi_{кам}^2 - \psi_e^2} = \alpha_{e1}(\psi_e - \psi_2),
 \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
 &u \quad 1; \\
 &= e - 1 \quad (\\
 & \quad \quad \quad \cdot 2.5); \quad q_e \\
 & \quad \quad \quad (31) \quad 4- \\
 &= 2 - 1 = / = \text{const.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases}
 \sigma(\psi_2 - \psi_3) = b\psi_1 - \chi; \\
 \alpha_{e1}(\psi_1 + \delta\psi - \psi_2) = \psi_2 - \psi_1 + \alpha_{ТВ1} u^{3/2} \sqrt{\psi_2^2 - \psi_3^2}; \\
 \alpha_{ТВ1} u^{3/2} \sqrt{\psi_2^2 - \psi_3^2} = \alpha_{31} \sqrt{\psi_3^2 - \psi_4^2}
 \end{cases} \quad (32)$$

2(1), 3(1), (1)

$$\begin{cases}
 \alpha_{e1}(\psi_1 - \psi_2) = \alpha_{e1} \xi^{3/2} \sqrt{\psi_2^2 - (\psi_1 + \delta\psi)^2}; \\
 \alpha_{e1} \xi^{3/2} \sqrt{\psi_2^2 - (\psi_1 + \delta\psi)^2} = \alpha_{e1}(\psi_1 + \delta\psi - \psi_2) -
 \end{cases} \quad (33)$$

(1), (1), (1)

1- (32)

$$\psi_3 = \psi_2 - \frac{b\psi_1 - \chi}{\sigma} \quad (34)$$

2-

3-

$$\left[\alpha_{e1}(\psi_1 + \delta\psi) - \psi_1 - (\alpha_{e1} - 1)\psi_2 \right]^2 = \alpha_{31}^2 \left(\psi_2 - \frac{b\psi_1 - \chi}{\sigma} \right)^2 - \alpha_{31}^2 \psi_4^2 \quad (35)$$

2·

$$\psi_2^2 - 2A\psi_2 + B = 0, \quad (36)$$

$$A = \frac{\left[\alpha_{e1}(\psi_1 + \delta\psi) - \psi_1 \right] (\alpha_{e1} - 1) - \alpha_{31}^2 \frac{b\psi_1 - \chi}{\sigma}}{(\alpha_{e1} - 1)^2 - \alpha_{31}^2};$$

$$B = \frac{\left[\alpha_{e1}(\psi_1 + \delta\psi) - \psi_1 \right]^2 - \alpha_{31}^2 \left[\left(\frac{b\psi_1 - \chi}{\sigma} \right)^2 - \psi_4^2 \right]}{(\alpha_{e1} - 1)^2 - \alpha_{31}^2}. \quad (37)$$

2

(36):

$$\psi_2 = A - \sqrt{A^2 - B}. \quad (38)$$

2.3.2. Спрощені вирази статичного розрахунку

$$4 \ll 3, \quad g > g_1 + g_3$$

$$\psi_2 = \frac{\left[(\alpha_{e1} - 1)^2 - \alpha_{31}^2 \frac{b}{\sigma} \right] \psi_1 + \alpha_{e1} (\alpha_{e1} - 1) \delta\psi + \alpha_{31}^2 \frac{\chi}{\sigma}}{(\alpha_{e1} - 1)^2 - \alpha_{31}^2}. \quad (39)$$

(39) 3,

5 %.

2

$$\psi_3 = (\alpha_{e1} - 1) \frac{(\alpha_{e1} - 1) \left[\left(1 - \frac{b}{\sigma} \right) \psi_1 + \frac{\chi}{\sigma} \right] + \alpha_{e1} \delta\psi}{(\alpha_{e1} - 1)^2 - \alpha_{31}^2}. \quad (40)$$

3-

(32)

4 << 3

$$u = \sqrt[3]{\frac{\alpha_{31}^2 / \alpha_{e1}^2}{(\psi_2 / \psi_3)^2 - 1}} \quad (41)$$

"

" 4' 2013

79

(39), (40),

$$u = \sqrt[3]{\frac{\alpha_{31}^2}{\alpha^2} \frac{1}{\left[\frac{\left[(\alpha_{e1} - 1)^2 - \alpha_{31}^2 \frac{b}{\sigma} \right] \psi_1 + \alpha_{e1} (\alpha_{e1} - 1) \delta \psi + \alpha_{31}^2 \frac{\chi}{\sigma}}{\left[(\alpha_{e1} - 1)^2 \left(1 - \frac{b}{\sigma} \right) \psi_1 + \alpha_{e1} (\alpha_{e1} - 1) \delta \psi + (\alpha_{e1} - 1)^2 \frac{\chi}{\sigma} \right]} \right]^2}}. \quad (42)$$

(36) $g_e = g_1 + g_3$

$$-2A' \psi_2 + B' = 0, \quad (43)$$

$$A' = [\alpha_{e1} (\psi_1 + \delta \psi) - \psi_1] (\alpha_{e1} - 1) - \alpha_{31}^2 \frac{b \psi_1 - \chi}{\sigma}; \quad (44)$$

$$B' = [\alpha_{e1} (\psi_1 + \delta \psi) - \psi_1]^2 - \alpha_{31}^2 \left[\left(\frac{b \psi_1 - \chi}{\sigma} \right)^2 - \psi_4^2 \right],$$

$$\psi_2 = \frac{B'}{2A'} = 0,5 \frac{[\alpha_{e1} (\psi_1 + \delta \psi) - \psi_1]^2 - \alpha_{31}^2 \left[\left(\frac{b \psi_1 - \chi}{\sigma} \right)^2 - \psi_4^2 \right]}{[\alpha_{e1} (\psi_1 + \delta \psi) - \psi_1] (\alpha_{e1} - 1) - \alpha_{31}^2 \frac{b \psi_1 - \chi}{\sigma}}. \quad (45)$$

(34), (41).

2.3.3. Вплив провідностей дроселів

3, 3, g_3 , g_e (31, 1), g_3 , $z = 0$, $g_e > g_1$, (g_e) , $3 (1 - b/\sigma)$.

$$u = \sqrt[3]{\frac{\alpha_{31}^2}{\alpha^2} \frac{\left[\left(1 - \frac{b}{\sigma} \right) \psi_1 + \delta \psi + \frac{\chi}{\sigma} \right]^2}{\frac{b \psi_1 - \chi}{\sigma} \left[\left(2 - \frac{b}{\sigma} \right) \psi_1 + 2 \delta \psi + \frac{\chi}{\sigma} \right]}}. \quad (46)$$

2.3.4. Випадок нульових витрат газу через внутрішній циліндричний дросель

$$p_4 \ll p_3, \quad (Q_1 \ll Q), \quad (2 - 1) \quad (32).$$

$$\psi_2 = \frac{\left(\alpha_{e1} + \alpha_{31} \frac{b}{\sigma}\right) \psi_1 + \alpha_{e1} \delta\psi - \alpha_{31} \frac{\chi}{\sigma}}{\alpha_{e1} + \alpha_{31}}; \quad (47)$$

$$\psi_3 = \frac{\alpha_{e1} \left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) \psi_1 + \alpha_{e1} \delta\psi + \alpha_{31} \frac{\chi}{\sigma}}{\alpha_{e1} + \alpha_{31}}; \quad (48)$$

$$u = \sqrt{\frac{\alpha_{31}^2}{\alpha_{e1}^2 - 1} \frac{1}{\left[\frac{\left(\alpha_{e1} + \alpha_{31} \frac{b}{\sigma}\right) \psi_1 + \alpha_{e1} \delta\psi - \alpha_{31} \frac{\chi}{\sigma}}{\alpha_{e1} \left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) \psi_1 + \alpha_{e1} \delta\psi + \alpha_{31} \frac{\chi}{\sigma}}\right]^2 - 1}}. \quad (49)$$

2.3.5. Статичні характеристики РПТ

(33):

$$\psi = \psi_1 - \frac{\alpha_{e1} \alpha_{31}}{\alpha_{e1} + \alpha_{31}} \left[\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) \psi_1 + \delta\psi + \frac{\chi}{\sigma} \right]; \quad (50)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{\alpha_{e1}^2 \alpha_{31}^2}{\alpha_{e1}^2 - 1 (\alpha_{e1} + \alpha_{31})^2} \frac{\left[\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) \psi_1 + \delta\psi + \frac{\chi}{\sigma} \right]^2}{\left\{ \psi_1 - \frac{\alpha_{e1} \alpha_{31}}{\alpha_{e1} + \alpha_{31}} \left[\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) \psi_1 + \delta\psi + \frac{\chi}{\sigma} \right] \right\}^2 - (\psi_1 + \delta\psi)^2}}. \quad (51)$$

2.4. Витратні характеристики

$$Q = g \cdot u^{3/2} \sqrt{p_2^2 - p_3^2} = g_3 \sqrt{p_3^2 - p_4^2} = g_3 p_3 \sqrt{\psi_3^2 (\psi_1) - \psi_4^2} = Q_T \cdot q_T \quad (52)$$

$Q =$; $q_T =$

$$Q = g_3 p_3 \left(p_3^2 - p_4^2 \right)^{0.5}, \quad (p_1 = 1), \quad Q_T$$

$$q = \frac{Q}{Q} = \frac{\alpha_{T1}}{\alpha_{31}} u^{3/2} \sqrt{\frac{\psi_2^2 - \psi_3^2}{\psi_{30}^2 - \psi_4^2}} \quad (53)$$

«0»

$$1 = 1.$$

$$q = \frac{\alpha_1(\psi_1 - \psi_2)}{\alpha_{31}\sqrt{\psi_{30}^2 - \psi_4^2}}; \quad q_1 = \frac{\psi_2 - \psi_1}{\alpha_{31}\sqrt{\psi_{30}^2 - \psi_4^2}}; \quad q_3 = \sqrt{\frac{\psi_3^2 - \psi_4^2}{\psi_{30}^2 - \psi_4^2}}; \quad (54)$$

$$q = \frac{\alpha_1(\psi_1 - \psi_2)}{\alpha_{31}\sqrt{\psi_{30}^2 - \psi_4^2}}; \quad q = \frac{\alpha_1}{\alpha_{31}} \xi^{3/2} \sqrt{\frac{\psi_2^2 - \psi_3^2}{\psi_{30}^2 - \psi_4^2}}.$$

$$\begin{cases} q = q_1 + q_3; \\ q = q_3, \end{cases} \quad (55)$$

(54)

(47), (48)

$4 \ll 3$

$$q_1 = \frac{\alpha_{e1}\delta\psi - \alpha_{31}\frac{\chi}{\sigma} - \alpha_{31}\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right)\psi_1}{\alpha_{31}\left[\alpha_{e1}\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) + \alpha_{e1}\delta\psi + \alpha_{31}\frac{\chi}{\sigma}\right]}; \quad (56)$$

$$q_T = q_3 = \frac{\alpha_{e1}\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right)\psi_1 + \alpha_{e1}\delta\psi + \alpha_{31}\frac{\chi}{\sigma}}{\alpha_{e1}\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) + \alpha_{e1}\delta\psi + \alpha_{31}\frac{\chi}{\sigma}}; \quad (57)$$

$$q_e = q_{ex} = q_{kam} = q_1 + q_T = \frac{(\alpha_{e1}\alpha_{31} - 1)\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right)\psi_1 + \alpha_{e1}(\alpha_{31} + 1)\delta\psi + \alpha_{31}(\alpha_{31} - 1)\frac{\chi}{\sigma}}{\alpha_{31}\left[\alpha_{e1}\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right) + \alpha_{e1}\delta\psi + \alpha_{31}\frac{\chi}{\sigma}\right]}. \quad (58)$$

2.5. Визначення необхідного перепаду тиску

$$q_1 = 0,$$

$$q_1 = 0 \quad (56)$$

$$\delta\psi = \frac{\alpha_{31}}{\alpha_{e1}} \left[\left(1 - \frac{b}{\sigma}\right)\psi_1 + \frac{\chi}{\sigma} \right], \quad (59)$$

$$\psi_1 > 1 -$$

$$\psi_1 = 1 -$$

2.6. Статична стійкість ЗВП

$$\kappa_u = -\partial\psi_1 / \partial u = -(\partial u / \partial \psi_1)^{-1}. \quad (60)$$

$$(41)$$

$$\kappa_u = \frac{3}{2} \frac{\alpha_{31}^2}{\alpha_{31}^2} u^2 \frac{[(\psi_2/\psi_3)^2 - 1]^2 \left[\frac{d(\psi_2/\psi_3)}{d\psi_1} \right]^{-1}}{\psi_2/\psi_3}. \quad (61)$$

$$- \frac{d(\psi_2/\psi_3)}{d\psi_1} / \psi_3^2, \quad d(\psi_2/\psi_3)/d\psi_1 = \left(\frac{d\psi_2/d\psi_1 - \psi_2 d\psi_3/d\psi_1}{\psi_3^2} \right) \quad (47), (48)$$

2.7. Традиційна конструкція гідроп'яти

$$\psi_1 = 0.$$

2-

$$(32)$$

$$\left(\frac{\psi_1 - \psi_2}{\psi_1} \right) \gg 0,1, \quad \sqrt{\psi_1^2 - \psi_2^2} = \alpha_{31} u^{3/2} \sqrt{\psi_2^2 - \psi_3^2}.$$

2

$$\psi_2^2 - 2A_0\psi_2 - B_0 = 0, \quad (62)$$

$$A_0 = \frac{\alpha_{31}^2}{1 + \alpha_{31}^2} \frac{b\psi_1 - \chi}{\sigma};$$

$$B_0 = \frac{\psi_1^2 - \alpha_{31}^2 \left[\left(\frac{b\psi_1 - \chi}{\sigma} \right)^2 - \psi_4^2 \right]}{1 + \alpha_{31}^2}, \quad (63)$$

$$\psi_2 = A_0 + \sqrt{A_0^2 + B_0}. \quad (64)$$

$$^3 (41).$$

$$(34),$$

$$B_0 = -A_0^2.$$

$$\left(\frac{\psi_1 - \psi_2}{\psi_1} \right) \gg 0,1, \quad \psi_2 = 0 = (b\psi_1 - \chi) / \sigma.$$

$$u = \sqrt[3]{\frac{1}{\alpha_{31}^2} \left[\frac{\sigma^2 \psi_1^2}{(b\psi_1 - \chi)^2} - 1 \right]}. \quad (65)$$

"

", 4' 2013

83

3. Приклад статичного розрахунку

$$Q = 46 \cdot 180 \cdot 10^{-3} \cdot 4,6 = 180 \cdot 4,6 = 828 \text{ (9)}$$

$$d_1 = d_3 = 240, \quad l_1 = l_3 = 120$$

$$h_1 = 0,5, \quad h_3 = 0,2$$

$$d_2 = 360, \quad d_3 = 440$$

$$h_2 = 0,15$$

$$p_4 = 0, \quad p_0 = 0,1$$

$$f_1 = \pi d_1 h_1 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ (2); } f_3 = \pi d_3 h_3 = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ (2)}$$

$$f = \pi (r_2 + r_3) h = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ (2)}$$

[8]

$$(Re \sim 10^4) = 0,016$$

$$\zeta_0 = 0,25 \lambda (d_3 - d_2) / z_A = 2,1$$

$$\zeta_{03} = \zeta_{a0} + 0,25 \lambda d_{03} / h_{03} = 3,4$$

$$= 1$$

[8].

$$(2)$$

$$g_1 = \pi d_1 h_1^3 / (12 \mu l_1) = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ (3); } g = f_1 / \sqrt{\rho \zeta_{T0}} = 37 \cdot 10^{-7} \text{ (3)}$$

$$g_3 = f_3 / \sqrt{\rho \zeta_{30}} = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ (3)}$$

$$s = T / p = 0,04 \text{ (2)}$$

$$\sigma = [0,25 \pi (d_2^2 - d_{01}^2) + 0,5 \pi (r_3^2 - r_2^2)] / s_A = 2,1$$

$$\sigma_1 = 0,01$$

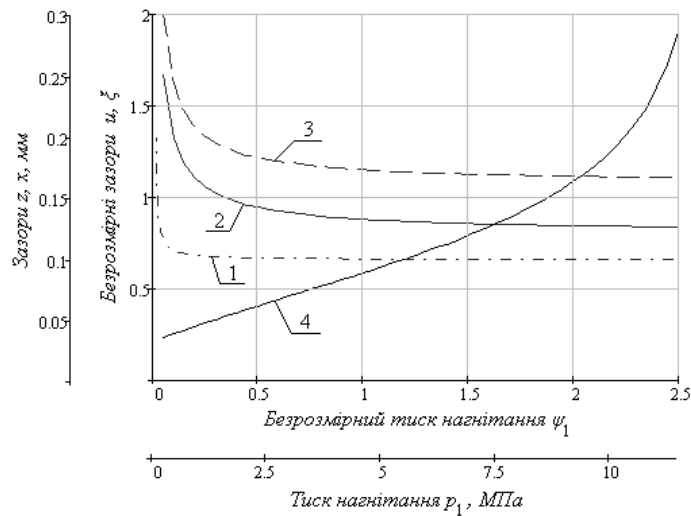
$$= 0,01$$

$$1 = 1,6, \quad 3_1 = 2, \quad 1 = 12, \quad 1 = 1, \quad 1 = 20$$

$$= 3, \quad 4 = 0, \quad = 1$$

$$\psi_1^{\max} = 2 \quad (59) \quad \delta\psi = 0,1$$

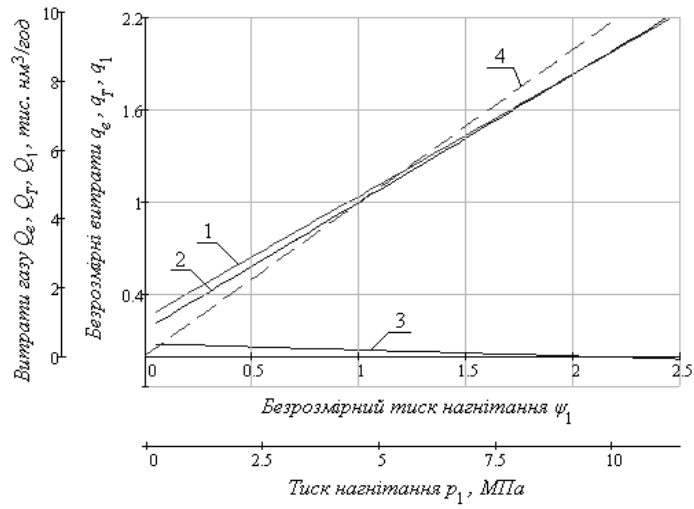
5-6.



$$5 - (2)$$

$$(3)$$

$$(1) (4)$$



Q_e (1); Q₁ (3); q_T, Q_T; (2); q_e, q₁; (4)

q₁ = q_T = q₃, Q₁ = Q_T = Q₃

±34 %; ±7 %; ±50 %; ±50 %; ±38 %; ±42 %

[6]

(. 5, . 2, 3).

50 %;

30 %;

10 %

4 %

1 < 2p

180-131-1

« — — ».

STATIC ANALYSIS OF THE LOCKING AUTOMATIC ROTOR-BALANCING DEVICE OF THE MULTISTAGE CENTRIFUGAL COMPRESSOR

I. V. Pavlenko¹,
Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov str., Sumy, 40007, Ukraine
E-mail: pavlenko@omdm.sumdu.edu.ua

In this paper describes the method of static analysis of the locking automatic rotor-balancing device of the multistage centrifugal compressor. This model determines the axial equilibrium of the rotor and the leakage through throttles.

Keywords: centrifugal compressor, axial throttle, regulator of pressure difference, axial force, static characteristics.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ЗАТВОРНО-УРАВНОВЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА РОТОРА МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

И.В. Павленко,
Сумский государственный университет,
2, ул. Римского-Корсакова, Сумы, 40007,
Украина
E-mail: pavlenko@omdm.sumdu.edu.ua

Ключевые слова:

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Korczak A. Tarcza odci zaj ca sił osiow w spr arce wirnikowej: Zgłoszenie patentowe. Rzeczpospolita Polska. Nr. P-365432 / A. Korczak, W. A. Marcinkowski, G. Peczkis.– 20.02.2004.
2. // – 1957.– 4.– 55-56.
3. / – 1972.– 110 .
4. – 1969.– 508 .
5. / – 2005.– 1.– 68-76. //
6. // – 2010.– 2.– 24-34.
7. / – 1980.– 200 .
8. / – 1982.– 135 .
9. « » / – // « ».– 2009.– 1.– 30-36.

27 2013 .