

УДК 621.165

**С.В. СТРУТИНСЬКИЙ**, канд. техн. наук НТУУ «КПІ»; Київ

**ГАЗОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У ВУЗЛАХ ВИСОКООБЕРТОВОГО ПНЕВМОШПИНДЕЛЯ НА АЕРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ ІЗ ТУРБІННИМ ПРИВОДОМ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В БАГАТОКООРДИНАТНОМУ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ КІНЕМАТИЧНИМИ СТРУКТУРАМИ**

Розглянуто багатокоординатне технологічне обладнання у вигляді верстата-робота із паралельними кінематичними структурами. Наведена конструктивна схема розробленого високо обертового пневмошпинделя. Він має спеціальні аеростатичні опори підвищеної несучої здатності та турбінний привод обертання. Визначено особливості газодинамічних процесів у вузлах пневмошпинделя при наявності його просторового переміщення. Дія додаткових об'ємних сил врахована у рівняннях Нав'є-Стокса, які записані для випадку наявності прискорень Коріоліса в рухомому текучому середовищі. Одержана система диференціальних рівнянь використана для досліджень течії повітря в щілинах аеростатичних підшипників та в осьовій пневмотурбіні.

**Ключові слова:** пневмошпиндель, аеростатична опора, турбіна, течія повітря, переносний рух, розподіл швидкостей.

**Вступ**

Багатокоординатне технологічне обладнання має широкі функціональні можливості. Воно забезпечує ефективну обробку, очищення або фарбування поверхонь різного виду розташованих довільним чином. Основним вузлом обладнання є високо обертовий шпиндель. Перспективною конструкцією є пневмошпиндель встановлений на аеростатичних опорах і оснащений пневматичним турбінним приводом.

Особливістю багатокоординатного обладнання є просторове переміщення пневмошпинделя. При цьому на обертові деталі та на рухомі частинки повітря діють інтенсивні коріолісові сили, які породжують складні газодинамічні процеси в пневмосистемі. Дослідження даних процесів необхідно для правильного проектування пневмошпинделя і тому є актуальними.

Проблема в загальному вигляді полягає в розробці пневматичних пристроїв із поліпшеними характеристиками. Проблема пов'язана із створенням високообертових пневмошпинделів на аеростатичних опорах, які допускають просторові переміщення при їх застосуванні в технологічному обладнанні. До невирішених раніше частин загальної проблеми відносяться встановлення закономірностей газодинамічних процесів у вузлах високо обертового шпинделя на аеростатичних опорах із турбінним приводом при наявності інтенсивного просторового поперечно-кутового переміщення шпинделя.

В останніх дослідженнях і публікаціях викладені результати розробки багатокоординатного технологічного обладнання з паралельними кінематичними зв'язками [1]. Встановлено, що виконавчий орган технологічного обладнання здійснює інтенсивні просторові поперечно-кутові переміщення [2]. При цьому на обертовий шпиндель обладнання діють значні гіроскопічні моменти [3, 4]. Показано, що для надійної роботи обладнання в ньому необхідно застосувати високообертовий пневмошпиндель на аеростатичних опорах [5].

Однак при просторових переміщеннях пневмошпинделя у його вузлах мають місце складні газодинамічні процеси обумовлені діями сил Кориоліса. Результатів досліджень даних процесів у літературних джерелах не виявлено.

Метою досліджень, викладених в даній статті, поставлено встановлення особливостей газодинамічних процесів у вузлах високообертового пневмошпинделя на аеростатичних опорах із турбінним приводом призначеного для використання в багатокоординатному технологічному обладнанні із паралельними кінематичними структурами.

Задачами досліджень є розробка конструкції високообертового пневмошпинделя, який дозволяє здійснювати інтенсивні просторові поперечно-кутові переміщення та визначення закономірностей газодинамічних процесів в аеростатичних опорах і турбінному приводі шпинделя при дії на рухоме повітря додаткових об'ємних сил обумовлених прискореннями Кориоліса.

### Основна частина

#### Конструктивні особливості пневмошпинделя

Застосування високообертового пневмошпинделя у верстатах з паралельними кінематичними структурами значно підвищує ефективність процесу обробки деталей. Основною перевагою пневмошпинделя є можливість здійснення його поперечно-кутового переміщення під час роботи верстата [6]. На верстаті з паралельними кінематичними структурами є можливість встановлення кількох пневмошпинделів до 3 і більше (рис. 1).

Пневмошпиндель, встановлений на платформі верстата-робота, здійснює складний просторовий рух. Платформа має шість ступенів вільності. Положення платформи характеризується координатами  $x, y, z$  характерної точки (полюса) платформи та трьома поперечно-кутовими координатами  $\psi, \theta, \phi$ , які визначають кути повороту платформи навколо вісей  $x, y, z$  (рис. 2).



Рис. 1 – Встановлення пневмошпинделя на рухомій платформі верстата з паралельними кінематичними структурами

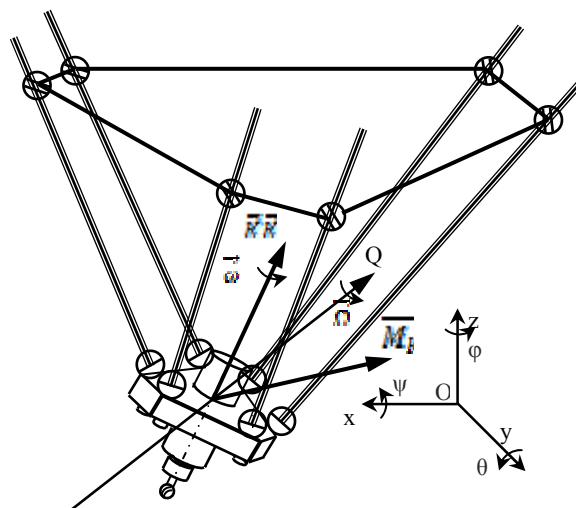


Рис. 2 – Просторове переміщення платформи верстата з високообертовим шпинделем як поворот навколо миттєвої вісі обертання  $Q$

У верстатах паралельної кінематики використовуються шпindelні вузли з частотою обертання 20000...150000 об/хв і вище. При повороті платформи навколо миттєвої осі обертання  $Q$  вісь шпинделя, який має велику кутову швидкість власного обертання  $\vec{\omega}$  також повертається навколо вісі  $Q$  з кутовою швидкістю  $\vec{\Omega}$ . При просторовому переміщенні платформи шпindel аналогічний гіроскопу. Тому на нього діють значні гіроскопічні моменти.

Враховуючи дані обставини була розроблена спеціальна конструкція пневмошпинделя з високою несучою здатністю аеростатичних опор (рис. 3).

Шпindel 1 встановлено в корпусі 2 на радіальних 3 та осьових 4 аеростатичних підшипниках. Всього шпindel має 10 радіальних та 4 осьових аеростатичних опор. Вони забезпечують високу несучу здатність і можливість сприйняття динамічних навантажень на шпindel, в тому числі навантажень обумовлених гіроскопічними моментами. Радіальні аеростатичні опори розміщені в трубчастих втулках корпуса через отвори яких здійснюється підвід повітря до дросельних пристроїв. Шпindel обертається турбіною 5. Повітря до турбіни підводиться через напрямний апарат 6.

Втулка 7 має ряд аеростатичних опор розташованих на її внутрішній та зовнішніх поверхнях (рис. 3, б). Аеростатичні опори живляться повітрям через дроселі у вигляді отворів малого діаметра. Повітря до дроселів підводиться через осьовий отвір 8 у втулці 7.

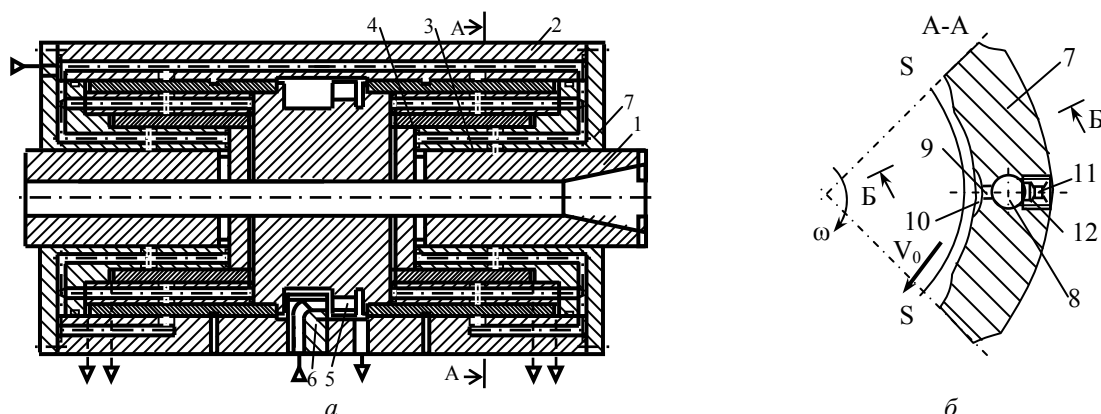


Рис. 3 – Конструктивна схема розробленого високо обертового пневмошпинделя: а – діаметральний перетин; б – радіальний аеростатичний підшипник

Дросель, який служить для подачі повітря до опори, розташованої на внутрішній поверхні втулки, має вигляд отвору малого діаметра 9. Через отвір 9 повітря подається до сегментного кармана 10, а з нього в щілину S-S між шийкою шпинделя і внутрішньою поверхнею втулки. Повітря до аеростатичної опори, розташованої на зовнішній поверхні втулки 7, підводиться через малорозмірний отвір 11 виконаний в різьбовій втулці 12. Отвір 11 має на виході дифузorne розширення для забезпечення вільного витоку повітря у щілину. Шпindel здійснює прецесійний рух з кутовою швидкістю прецесії  $\vec{\Omega}$  (рис. 4). Враховуючи, що кутова швидкість повороту платформи  $\vec{\Omega}$  набагато менша частоти обертання шпинделя  $\vec{\Omega} \ll \vec{\omega}$  для визначення динамічних навантажень на шпindel застосовано наближену теорію руху гіроскопів [7]. Головний момент кількості руху шпинделя складає:

$$\vec{K} = I\vec{\omega}, \quad (1)$$

де  $I$  – момент інерції шпинделя відносно власної осі обертання.

Гіроскопічний момент, який діє на шпindel, визначається із векторної залежності:

$$\vec{M}_k = I \vec{\omega} \times \vec{\Omega} \quad (2)$$

Модуль гіроскопічного моменту відповідно (2) дорівнює

$$|\vec{M}_k| = I |\vec{\omega}| \cdot |\vec{\Omega}| \sin \gamma, \quad (3)$$

де  $\gamma$  – кут між віссю шпинделя і миттєвою віссю повороту виконавчого органу.

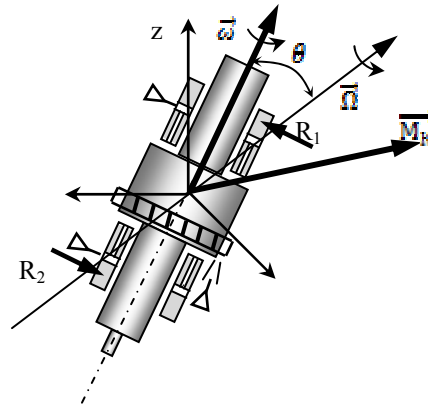


Рис. 4 – Схема дії гіроскопічного моменту на високо обертовий пневмошпindel

Гіроскопічні моменти діють в радіальній площині шпинделя. Це приводить до виникнення відповідних реакцій аеростатичних опор шпинделя. Реакції в опорах  $R_1$ ,  $R_2$  мають значну величину. Їх напрямок змінюється в залежності від положення платформи. Тому аеростатичні опори шпинделя повинні мати велику несучу здатність і забезпечувати працездатність шпинделя при інтенсивних поперечно-кутових переміщеннях.

**Особливості газодинамічних процесів у вузлах пневмошпинделя**

В об'ємі текучого повітря в аеростатичних опорах та турбінному приводі виникають специфічні газодинамічні процеси обумовлені дією переносних поворотних рухів шпинделя. На кожен частинку рухомого повітря в проточній частині шпинделя діє додаткова масова сила. Питома віднесена до одиниці об'єму, сила  $\vec{G}_k$ , обумовлена прискоренням Коріоліса визначається векторною залежністю:

$$\vec{G}_k = -2\rho\vec{\Omega} \times \vec{V}, \quad (4)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $\vec{\Omega}$  – вектор кутової швидкості переносного поворотного руху шпиндельного вузла;  $\vec{V}$  – вектор швидкості частинок повітря.

Проекції масової сили  $G_{kx}$ ,  $G_{ky}$ ,  $G_{kz}$  на вісі декартової прямокутної системи координат  $x, y, z$  визначаються залежностями:

$$G_{kx} = -2\rho(\Omega_y v_z - \Omega_z v_y), \quad G_{ky} = -2\rho(\Omega_z v_x - \Omega_x v_z), \quad G_{kz} = -2\rho(\Omega_x v_y - \Omega_y v_x) \quad (5)$$

де  $V_x, V_y, V_z$  – проекції на осі координат вектора швидкості частинок повітря;  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  – проекції кутової швидкості переносного руху.

Розглянемо диференціальні рівняння ламінарного руху текучого середовища, що не стискається (рівняння Нав'є-Стокса). У векторному вигляді рівняння має вигляд [8]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F}_0 - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \nabla^2 \vec{V}, \quad (6)$$

де  $\vec{F}_0$  – вектор сил, які діють на одиницю об’єму текучого середовища;  $\rho$  – тиск рідини в точці;  $\nu = \mu / \rho$  – кінематична в’язкість середовища;  $\mu$  – динамічна в’язкість.

При наявності переносного руху шпindelного вузла вектор об’ємних сил, які діють на частинку повітря буде визначено у вигляді:

$$\vec{G}_0 = \vec{G} + \vec{G}_K = \rho \vec{F} - 2\rho \vec{\Omega} \times \vec{V}, \quad (7)$$

де  $\vec{F}$  – вектор об’ємних сил іншої природи (гравітаційні та інші). Підставивши значення об’ємної сили із (7) в рівняння Нав’є-Стокса (6) одержимо:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V}. \quad (8)$$

Таким чином наявність переносного руху змінює диференціальні рівняння течії повітря в проточній частині шпindelного вузла. Векторний добуток в правій частині рівняння (8) обумовлює додатковий перепад тиску, що діє на рухомому частинку повітря. Цей перепад тиску змінює гідродинамічні параметри течії повітря, зокрема розподіл швидкостей в проточній частині.

Векторне рівняння (8) в проєкціях на осі координат із врахуванням (4, 5) набудуть вигляду трьох скалярних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= F_x - 2(\Omega_y v_z - \Omega_z v_y) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= F_y - 2(\Omega_z v_x - \Omega_x v_z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= F_z - 2(\Omega_x v_y - \Omega_y v_x) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Одержана система рівнянь (9) послужила основою для аналізу газодинамічних процесів у проточній частині пневмошпindelля.

Проведено розрахунки поля швидкостей в щілинах аеростатичних підшипників. Течія рідини в щілинах відзначається складністю газодинамічних процесів. Тому для визначення впливу прискорень Коріоліса на течію повітря в щілині розглянуто ряд спрощених схем течії. При обертанні шпindelля з високою частотою в зазорі аеростатичної опори має місце течія близька до течії Куєтта [8] при незначному осьовому перепаді тиску  $p_1 - p_2$  (рис. 5).

Прийmemo лінійний розподіл швидкостей в перетині щілини. При цьому окружна швидкість частинок повітря в щілині:

$$V_y = \frac{V_0}{2} \left( 1 - \frac{x}{h} \right), V_x = V_z = 0, \quad (10)$$

де  $V_0 = \omega \cdot r$  – окружна швидкість поверхні шийки шпindelля;  $\omega$  – кутова швидкість обертання шпindelля;  $r$  – радіус шийки шпindelля;  $2h$  – ширина щілини;  $x$  – відстань від початку системи координат до поточної точки в якій визначено швидкість.

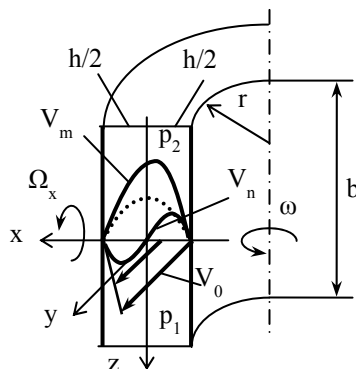


Рис. 5 – Особливості течії повітря в щілині аеростатичного підшипника

Розглянемо характер дії сил Кориоліса на частинки повітря в перетині щілини в площині  $xoz$  при наявності переносного поворотного руху, який характеризується проекціями кутової швидкості  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ . Враховуючи, що швидкість переносного руху набагато менша частоти обертання шпинделя можна знехтувати поворотом навколо вісі  $z$  і прийняти  $\Omega_z \approx 0$ . Відповідно із рівнянь (5), (10) випливає, що на кожену частинку повітря в щілині діє об'ємна сила в напрямку вісі  $z$ , яка лінійно змінюється по ширині щілини по закону:

$$F_{kz} = -2\Omega_x V_y. \quad (11)$$

Підставивши значення швидкості (10) в формулу (11) одержимо осьову силу, яка діє на частинки повітря в щілині в напрямку вісі  $z$ :

$$F_{kz} = -\Omega_x V_0 \left(1 - \frac{x}{h}\right).$$

Розглянемо додаткову накладену на течію Куетта повільну течію повітря в щілині в напрямку вісі  $z$  під дією деякого перепаду тиску  $(p_1 - p_2)/b = \frac{dp}{dz}$ , який обумовлений надлишковим тиском в кармані аеростатичного підшипника. Із останнього із рівнянь Нав'є-Стокса (9) із врахуванням (10) випливає:

$$\frac{d^2 V_z}{dx^2} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{dp}{dz} + \rho \Omega_x \omega r \right) - \frac{\rho}{\mu} \Omega_x \omega r \frac{x}{h}. \quad (12)$$

Подамо рівняння (12) у вигляді:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = D - kx, \quad (13)$$

де константи визначені залежностями:

$$D = \frac{1}{\mu} \left( \frac{dp}{dz} + \rho \Omega_x \omega r \right), \quad k = \frac{\rho \omega r \Omega_x}{\mu h}. \quad (14)$$

Проінтегруємо рівняння (12) двічі і одержимо ( $c_1, c_2$  константи інтегрування):

$$V_z = \frac{Dx^2}{2} - \frac{kx^3}{6} + c_1 x + c_2. \quad (15)$$

Для визначення констант інтегрування використано крайові умови:  $V_z = 0$  при  $x = \pm h$ . Після підстановки крайових умов у залежність (15) і розв'язку одержаної системи рівнянь знайдемо:

$$c_1 = \frac{kh^2}{6}, \quad c_2 = -\frac{Dh^2}{2}. \quad (16)$$

Відповідно розподіл осьових швидкостей в перетині щілини із врахуванням (15), (16) та (14) знайдено у вигляді:

$$V_z = \frac{h^2}{2\mu} \frac{dp}{dz} \left( 1 + \frac{\rho\Omega_x \omega r}{dp/dz} \right) \left( 1 - \frac{x^2}{h^2} \right) \cdot \left[ 1 + \frac{1}{3} \frac{x}{h} \cdot \frac{\rho\Omega_x \omega r / (dp/dz)}{\left( 1 + \frac{\rho\Omega_x \omega r}{dp/dz} \right)} \right]. \quad (17)$$

Введемо відносну кутову швидкість переносного руху  $\Gamma_x$  та характерну швидкість  $V_m$  згідно співвідношень:

$$\Gamma_x = \frac{\rho\Omega_x \omega r}{dp/dz}, \quad V_m = \frac{h^2}{2\mu} \frac{dp}{dz}. \quad (18)$$

Відповідно розподіл осьових швидкостей в перетині щілини:

$$V_z = V_m (1 + \Gamma_x) \left( 1 + \frac{1}{3} \frac{x}{h} \cdot \frac{\Gamma_x}{1 + \Gamma_x} \right) \left( 1 - \frac{x^2}{h^2} \right). \quad (19)$$

Розрахунки за даною формулою визначають профіль осьових швидкостей в щілині при наявності поворотного переносного руху (рис. 6). Із аналізу наведених на рис. 6 кривих випливає, що переносна кутова швидкість обертання шпинделя приводить до суттєвих змін профіля швидкості частинок повітря в щілині. При цьому в залежності від напрямків дії перепаду тиску  $dp/dz$  та кутової швидкості  $\Omega_x$  переносний рух пришвидшує або сповільнює течію повітря в щілині. При ( $\Gamma_x > 0$ ) має місце збільшення швидкості, а при ( $\Gamma_x < 0$ ) сповільнення течії повітря. При відносних швидкостях переносного руху ( $\Gamma_x \leq -0,4$ ) на профілі швидкостей спостерігається точка перегину із появою зворотної течії в щілині, де швидкості частинок повітря протилежні напрямку перепаду тиску. Це приводить до асиметрії течії в щілині відносно дросельних отворів аеростатичних підшипників (рис. 7).

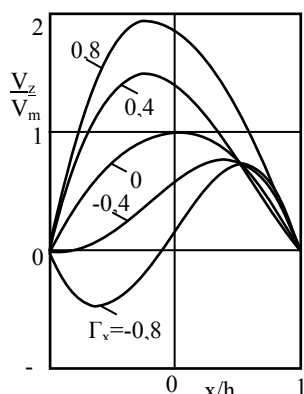


Рис. 6 – Розрахункові профілі осьових швидкостей в перетинах щілини при різних відносних значеннях швидкості переносного руху  $\Gamma_x$

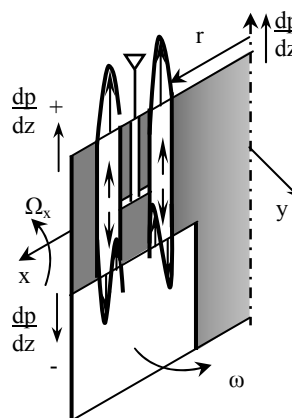


Рис. 7 – Асиметрія течії повітря в щілинах аеростатичних підшипників шпинделя обумовлена наявністю переносного поворотного руху

Асиметрія течії приведе до зменшення несучої здатності підшипника. Зменшення несучої здатності запропоновано компенсувати використавши додаткові аеростатичні підшипники розташовані концентрично. При цьому асиметрія розподілу тиску, що виникає за рахунок переносного руху значною мірою компенсується.

В щілинах аеростатичних підшипників має місце складний рух повітря. Проведено теоретичне дослідження течії повітря в щілині. Розрахунки виконані на основі методу ламінарної аналогії [9]. Згідно даного методу закономірності розподілу середніх швидкостей при ламінарному русі повітря в щілині еквівалентні закономірності розподілу швидкостей при плоскому русі ідеальної рідини. Виконано розрахунки плоского руху ідеальної рідини, а результати перенесені на розрахунок в'язкої течії повітря в щілині [10]. Функція течії плоского руху ідеальної рідини одержана у вигляді суперпозиції функцій течії  $n$  джерел (витоків) рідини [8]:

$$\psi = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{y - y_k}{x - x_k} \right), \quad (20)$$

де  $Q_k$  – витрата рідини з  $k$ -го джерела (стоку);  $x, y$  – поточні координати визначені в площині щілини;  $x_k, y_k$  – координати розташування  $k$ -го джерела (стоку).

Залежність (20) визначає картину ліній течії (траєкторій) частинок повітря в середньому перетині щілини. Лінії течії знайдені згідно залежностей  $\psi = \text{const}$  для різних умов течії в щілині. При мінімальних обертах шпинделя його окружна швидкість обертання мало впливає на течію в щілині (рис. 8, а).

Течія повітря в щілині має складний характер. В цілому повітря, яке витікає із сегментного кармана, розповсюджується в двох взаємно-перпендикулярних напрямках з витратами  $Q_1, Q_2$  та  $Q_3, Q_4$ . Співвідношення витрат  $Q_1$  та  $Q_2$  залежить від величини окружної швидкості шпинделя. При малих окружних швидкостях (рис. 8, а) значення витрат є близькими  $Q_1 \approx Q_2$ .

Високооборотний шпиндель має значну окружну швидкість. Тому в щілині підшипника має місце додаткова течія повітря, обумовлена переміщенням однієї із стінок щілини. Дане явище враховане введенням додаткових джерел у формулу (20). Переміщення стінки щілини суттєво змінює картину течії повітря (рис. 8, б). Також змінюється баланс витрат на виході щілини. При значних окружних швидкостях витрати  $Q_1$  і  $Q_2$  суттєво відрізняються між собою. Причиною цього є вплив рухомої поверхні шпинделя на течію повітря в щілині.

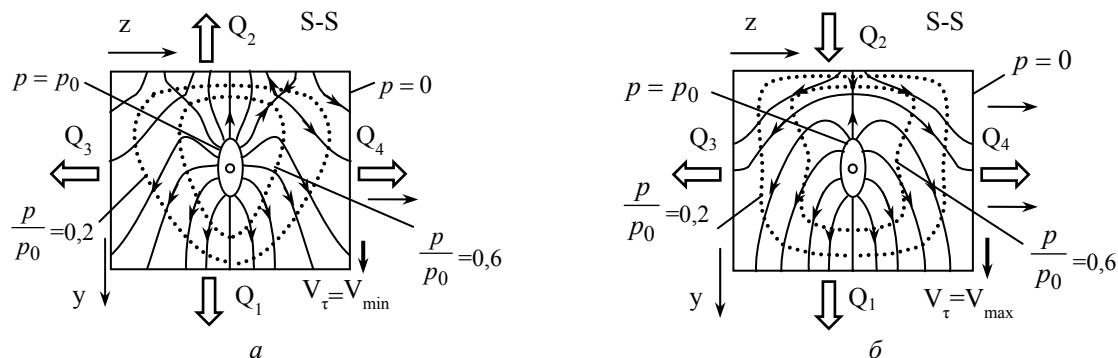


Рис. 8 – Картини ліній течії повітря в щілині S-S та ізобари:  
а – при мінімальних обертах шпинделя; б – при максимальних обертах шпинделя



Розрахункові за формулою (20) значення функції течії використано для знаходження середніх швидкостей в перетинах щілини. Швидкості визначені шляхом диференціювання залежності (20) відповідно формул:

$$V_{mx} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(x-x_k)}{[(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2]}, \quad V_{my} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(y-y_k)}{[(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2]} \quad (21)$$

В кожному перетині щілини шириною  $2h$  має місце параболический розподіл проекцій швидкостей:

$$v_z = V_{mz} \left[ 1 - \left( \frac{x}{h} \right)^2 \right] + \omega r [1 - z/(2h)], \quad v_y = V_{my} \left[ 1 - \left( \frac{x}{h} \right)^2 \right]. \quad (22)$$

Векторне поле максимальних швидкостей в перетинах щілини знаходиться у вигляді:

$$\vec{V}_m = \vec{j}V_{my} + \vec{k}V_{mz},$$

де  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орти декартової системи координат  $x, y, z$ .

Векторне поле максимальних швидкостей пов'язане із полем градієнта статичного тиску по площі щілини згідно співвідношення:  $grad p = -\frac{2\mu}{h^2} \vec{V}_m$ .

Відповідно проекції градієнта тиску:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2\mu}{h^2} V_{mx}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{2\mu}{h^2} V_{my}. \quad (23)$$

Інтегрування даних залежностей визначає скалярне поле статичного тиску в перетині щілини обчисленням інтеграла по деякій лінії  $L$ :  $p = \int_L \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy$ .

Відповідним вибором набору ліній  $L_1, L_2$  охоплено характерні області щілини і визначено поле статичного тиску в щілині. Ізобари течії показані пунктирними лініями на рис. 8. В області критичних точок течії має місце підвищення статичного тиску.

Як показано раніше, переносний рух шпинделя приводить до виникнення додаткового перепаду тиску в щілині. Із рівняння Нав'є-Стокса (9) випливає, що внаслідок дії сил Кориоліса в щілині виникає додатковий змінний по площі щілини градієнт тиску з проекціями:

$$\frac{\partial p_K}{\partial z} = 2\rho\Omega_x V_y, \quad \frac{\partial p_K}{\partial y} = 2\rho\Omega_x V_z. \quad (24)$$

Прийmemo в якості першого наближення, що додатковий градієнт тиску пропорційний максимальній швидкості повітря в перетинах щілини.

При цьому розподіл тиску в щілині в першому наближенні визначиться геометричною сумою тиску обумовленого напірним рухом повітря (23) та додаткового градієнта тиску обумовленого дією прискорення Кориоліса (24).

Результуюче поле статичного тиску в щілині, що враховує переносний рух змінюється набуваючи асиметричного вигляду (рис. 9).

Внаслідок переносного руху в щілині формуються наведені (індуктивні) течії, що характеризуються потоками повітря  $Q_{k1} - Q_{k4}$  та  $Q_{v1}, Q_{v2}$ . В цілому інтенсивність даних потоків є незначною, що обумовлено значними втратами енергії на тертя повітря біля стінок щілини.

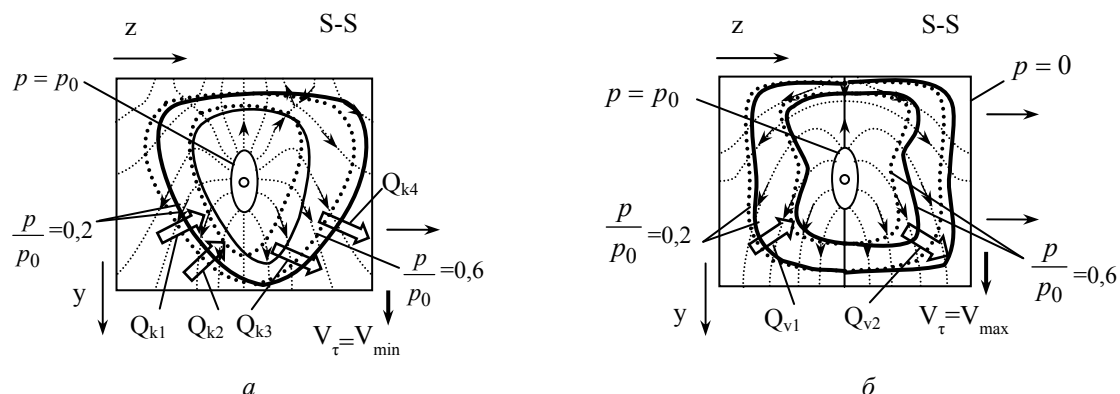


Рис. 9 – Вплив переносного руху на поле статичного тиску в щілині аеростатичного підшипника: *a* – при мінімальних обертах шпинделя; *б* – при максимальних обертах шпинделя

В якості привода шпинделя використана осьова турбіна (рис. 10). При течії повітря в турбіні швидкість частинок повітря змінюється за величиною і по напрямку. При цьому має місце постійна витрата повітря в осьовому напрямку  $Q_T$ .

В напрямному апараті формується потік повітря із характерною швидкістю  $W_1$ . Внаслідок окружної швидкості турбіни  $V_3$  відносна швидкість потоку в міжлопаточному просторі збільшується до значення  $C_1$ . Переносний поворотний рух турбіни характеризується кутовою швидкістю  $\vec{\Omega}$  з проєкціями  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$ ,  $\Omega_z$ . Проєкції  $\Omega_x$  та  $\Omega_y$  діють в площині трикутника швидкостей  $W_1$ ,  $C_1$  і визивають сили Коріоліса, які діють в радіальному відносно осі турбіни напрямку. Вони не впливають суттєво на крутний момент турбіни.

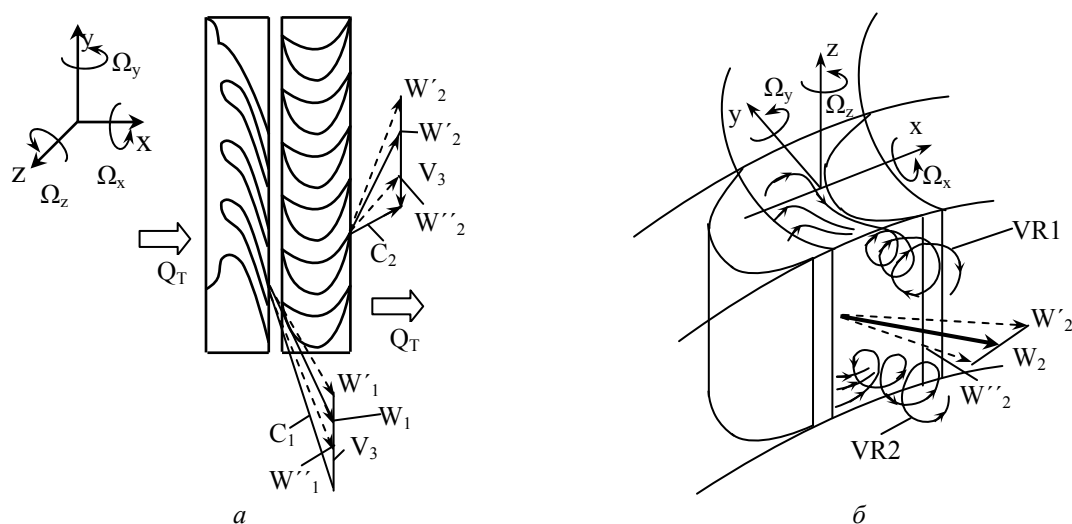


Рис. 10 – Конструктивні схеми: *a* – схема турбінного привода пневмошпинделя; *б* – схема вихроутворення в міжлопаточному просторі турбіни

Проєкція кутової швидкості  $\Omega_z$  має значний силовий вплив на потік повітря. В залежності від напрямку обертання має місце відхилення швидкості потоку  $W_1$  від його номінального значення. Зміни напрямку швидкості потоку відбуваються в межах  $W'_1 \dots W''_1$ . Це приводить до змін крутного моменту турбіни. Зміни швидкості на виході

турбіни  $W'_2...W''_2$  також впливають на крутний момент. В певній мірі дані зміни моменту компенсуються, тому переносний рух шпинделя не впливає суттєво на турбінний привід шпинделя.

Сили Коріоліса інтенсифікують процес вихроутворення в міжлопаточному просторі турбіни (рис. 10, б). При збільшенні крутного моменту росте перепад тиску в областях на зовнішній і внутрішній поверхнях сусідніх лопаток. Відповідно зростає інтенсивність вихрових рухів  $VR1$  та  $VR2$  на поверхні турбіни бандажа, який встановлений по периметру лопаток. В результаті проведених досліджень розроблено дослідний зразок напрямного апарату і турбіни (рис. 11), які компенсують негативні наслідки переносного руху шпинделя.



а



б

Рис. 11 – Дослідний зразок напрямного апарату і турбіни: а – турбіна використана в якості привода шпинделя; б – напрямний апарат для формування потоку повітря на турбіну

### Висновки

1. Встановлено, що прискорення Коріоліса, які мають місце внаслідок поперечно-кутових переміщень шпинделя суттєво впливають на характер течії повітря в щілинах аеростатичних підшипників. В залежності від напрямку вектора кутової швидкості переносного руху відбувається деформація профіля швидкостей частинок повітря в щілині. При інтенсивних переносних рухах можливі зворотні течії в щілині, а відповідно збільшення її гідравлічного опору.

2. Для компенсації негативних наслідків дії переносного руху рекомендується конструкція шпинделя із концентричними аеростатичними опорами, в яких одна опора утворена рухомою шийкою шпинделя та нерухомою втулкою корпусу, а відповідна їй концентрична опора утворена зовнішньою циліндричною поверхнею нерухомої втулки та внутрішньою поверхнею кільця закріпленого на шпинделі.

3. Зміни кутової швидкості переносного руху обумовлюють відповідні зміни крутного моменту, який розвивається турбіною. Для зменшення зміни крутного моменту напрямний апарат турбіни доцільно розташувати в площині перпендикулярній преваляю чому напрямку кутової швидкості переносного руху.

4. Як напрямок подальших досліджень рекомендується провести промислову апробацію розробленого пневмошпинделя в складі багатокоординатного технологічного обладнання із визначенням його статичних і динамічних характеристик.

**Список літератури:** 1. *Сяньвень, Кун* Структурный синтез параллельных механизмов [Текст] / Кун Сяньвень, Госселин Клемент. – М. : Физматлит, 2012. – 275 с. 2. *Рыбак, Л. А.* Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры [Текст] / Л. А. Рыбак, В. В. Ержуков, А. В. Чичварин. – М. : Физматлит, 2011. – 148с. – 100 экз. – ISBN 978-5-9221-1296-3. 3. *Афонин, В. Л.* Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры [Текст] / В. Л. Афонин, П. В. Подзоров, В. В. Слепцов ; под общ. ред. В. Л. Афонина. – М. : МГТУ Станкин, Янус-К, 2006. – 452с. – 1000 экз. – ISBN 5-8037-0356-7. 4. *Струтинский, В. Б.* Вплив гіроскопічних моментів на обертіві деталі шпиндельного вузла верстата паралельної кінематики [Текст] / В. Б. Струтинський, О. Я. Юрчишин, В. А. Рудаков // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування. – 2012. – №66. – С. 26–31. 5. *Струтинский, В. Б.* Эксплуатационные динамические нагрузки на детали высокооборотного шпиндельного узла станка параллельной кинематики [Текст] / В. Б. Струтинский, О. Я. Юрчишин // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении : сб. науч. тр. – Ирбит : ЗАО «ОНИКС», 2014. – С. 151–162. 6. *Струтинский, С. В.* Просторові системи приводів [Текст] : моногр. / С. В. Струтинський, А. А. Гуржій. – К. : Педагогічна думка, 2013. – 492 с. 7. *Павловский, М. А.* Теоретична механіка [Текст] : підручник / М. А. Павловський – К. : Техніка, 2002. – 512 с. : іл. – Бібліогр.: с. 494–496. – Дод. : с. 490–492. – ISBN 966-575-184-0. 8. *Лойцянский, Л. Г.* Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1973. – 847с. 9. *Повх, И. Л.* Техническая гидромеханика [Текст] / И. Л. Повх. – Л. : Машиностроение, 1976. – 504 с. 10. *Яхно, О. М.* Гідродинаміка струмінних течій в щілинах регульованих гідростатичних сферичних шарнірів [Текст] / О. М. Яхно, С. В. Струтинський // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – Київ, 2011. – №6 (80) – С. 125–131.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sjan'ven', Kun, and Gosselin Klement. *Strukturnyj sintez parallel'nyh mehanizmov*. Moscow: Fizmatlit, 2012. Print. 2. Rybak, L. A., V. V. Erzhukov and A. V. Chichvarin. *Jeffektivnye metody reshenija zadach kinematiki i dinamiki robota-stanka parallel'noj struktury*. Moscow: Fizmatlit, 2011. ISBN 978-5-9221-1296-3. Print. 3. Afonin, V. L., P. V. Podzorov and V. V. Slepcev. *Obrabatyvajushhee oborudovanie na osnove mehanizmov parallel'noj struktury*. Moscow: MGTU Stankin, Janus-K, 2006. ISBN 5-8037-0356-7. Print. 4. Strutyns'kyy, V. B., O. Ya. Yurchyshyn and V. A. Rudakov. "Vplyv hiroskopichnykh momentiv na obertovi detali shpyndel'noho vuzla verstata paralel'noyi kinematyky." *Journal of Mechanical Engineering National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Ser.: Mashynobuduvannya*. No. 66. Kyiv: NTUU "KPI", 2012. 26–31. Print. 5. Strutynskij, V. B., and O. Ja. Jurchishin. "Jekspluatacionnye dinamicheskie nagruzki na detali vysokooborotnogo shpindel'nogo uzla stanka parallel'noj kinematiki." *Problemy proektirovanija i avtomatizacii v mashinostroenii: sb. nauch. tr.* Irbit: ZAO "ONIKS", 2014. 151–162. Print. 6. Strutyns'kyy, S. V., and A. A. Hurzhij. *Prostorovi systemy pryvodiv*. Kyiv: Pedagogichna dumka, 2013. Print. 7. Pavlovs'kyy, M. A. *Teoretychna mekhanika*. Kyiv: Tekhnika, 2002. ISBN 966-575-184-0. Print. 8. Lojczanskij, L. G. *Mehanika zhidkosti i gaza*. Moscow: Nauka, 1973. Print. 9. Povh, I. L. *Tehnicheskaja gidromekhanika*. Leningrad: Mashinostroenie, 1976. Print. 10. Yakhno, O. M., and S. V. Strutyns'kyy. "Hidrodynamika struminykh techij v schilynakh rehul'ovanykh hidrostatychnykh sferychnykh sharniriv." *Naukovi visti NTUU "KPI"*. No. 6 (80). Kyiv: NTUU "KPI", 2011. 125–131. Print.

*Надійшла (received) 05.01.2015*