

**РОЗРОБЛЕННЯ ВИСОКООБЕРТОВОГО ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕЧІЇ В СТРУМЕНЕВИХ ПОТОКАХ У ПНЕВМОТУРБІННОМУ ПРИВОДІ****DEVELOPMENT OF THE HIGH-SPEED SPINDLE AND IDENTIFICATION OF THE JET STREAM FLOW FEATURES, ARISING IN ITS AIR TURBINE**

*Мета.* Розроблення ефективного шпиндельного вузла з пневмотурбінним приводом із врахуванням особливостей течії в малорозмірних струменевих потоках кінцевих розмірів, які мають місце в турбіні і напрямному апараті.

*Методи дослідження.* Застосовано теоретичні методи дослідження основані на розрахунку на ЕОМ параметрів течії в міжлопатковому просторі турбіни. Розроблено метод визначення характеристик вторинних течій шляхом розгляду сингулярних областей течії в міжлопатковому просторі турбіни та відповідному спрощенні рівнянь гідромеханіки.

*Результати дослідження.* Розроблено інноваційну конструкцію шпинделя на аеростатичних опорах. Описані якісні особливості процесів течії повітря у пневмотурбінному приводі. Обґрунтовано розрахункову схему та крайові умови чисельного розрахунку течії в міжлопатковому просторі турбіни. Проведено розрахунки траєкторій руху частинок повітря, поля швидкостей та статичного тиску в проточній частині турбіни. Встановлено особливості течії, зокрема наявність циркуляційних та відривних областей. На основі чисельних розрахунків обґрунтовано схему виникнення вторинних течій повітря, яка базується на аналізі сингулярних розв'язків рівнянь гідромеханіки. Встановлено умови виникнення вихрових вторинних течій в міжлопатковому просторі турбіни. Визначені кількісні характеристики вторинних течій.

*Висновки.* Встановлено, що вихрові течії породжуються в міжлопатковому просторі турбіни в області сингулярності поля швидкостей, де виникає додатковий циркуляційний рух повітря, який має кілька різновидів, що залежать від величини компонент тензора швидкостей деформацій. Вихрові вторинні течії в міжлопатковому просторі виникають при умові наявності двох чисто уявних власних значень матриці компонент тензора швидкостей деформацій. Дана сингулярна область відповідає стійкому центру у вигляді вихроджерела. В міжлопатковому просторі пневмотурбіни виникає складна течія повітря, яка супроводжується формуванням парного вихора, інтенсивність якого визначена у вигляді об'ємного інтеграла ротора швидкості, який зростає в залежності від швидкості натікаючого потоку повітря. Аналогічний зріст має місце для інтенсивності вихрових трубок та середньої по периметру вихрової трубки тангенціальної швидкості частинок повітря.

*Ключові слова:* пневмошпиндель, турбіна, течія повітря, чисельні розрахунки, вторинні течії, характеристики.

**Вступ**

Високообертові шпиндельні вузли на аеростатичних опорах з турбінним приводом є прогресивним технологічним обладнанням, яке застосовується у багатокоординатних верстатах із складним просторовим рухом інструменту. Характеристики шпиндельного вузла визначаються процесами течії повітря у турбінному приводі. Тому дослідження процесів течії повітря у турбіні та напрямному апараті шпиндельного вузла є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає у розробці високообертового шпиндельного вузла з поліпшеними характеристиками на основі дослідження особливостей течії повітря в турбіні.

Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями створення вискоефективного багатокоординатного технологічного обладнання.

В останніх дослідженнях і публікаціях викладено результати розрахунків та експериментальних вимірів характеристик течії у турбінних пристроях [1]. В основному вони стосуються дослідження парових та гідротурбін великих розмірів [2, 3]. Особливості течії в'язкого газу в турбінах досліджуються шляхом числового розрахунку поля течії в проточній частині [4]. Встановлені лінії течії, профілі швидкостей середовища. В окремих публікаціях встановлені особливості вихроутворення в турбінах [5]. Досліджено особливості структури потоків та виникнення струминних течій у турбінах [6]. В [7] розглянуто течію в турбінах при зміні геометрії направляючого апарата і відповідних змінах вхідних потоків турбіни. Встановлено особливості вторинних течій в міжлопатковому просторі. Особливістю наведених досліджень є те, що вони стосуються турбін великих розмірів. Недоліком досліджень є складність інтерпретації

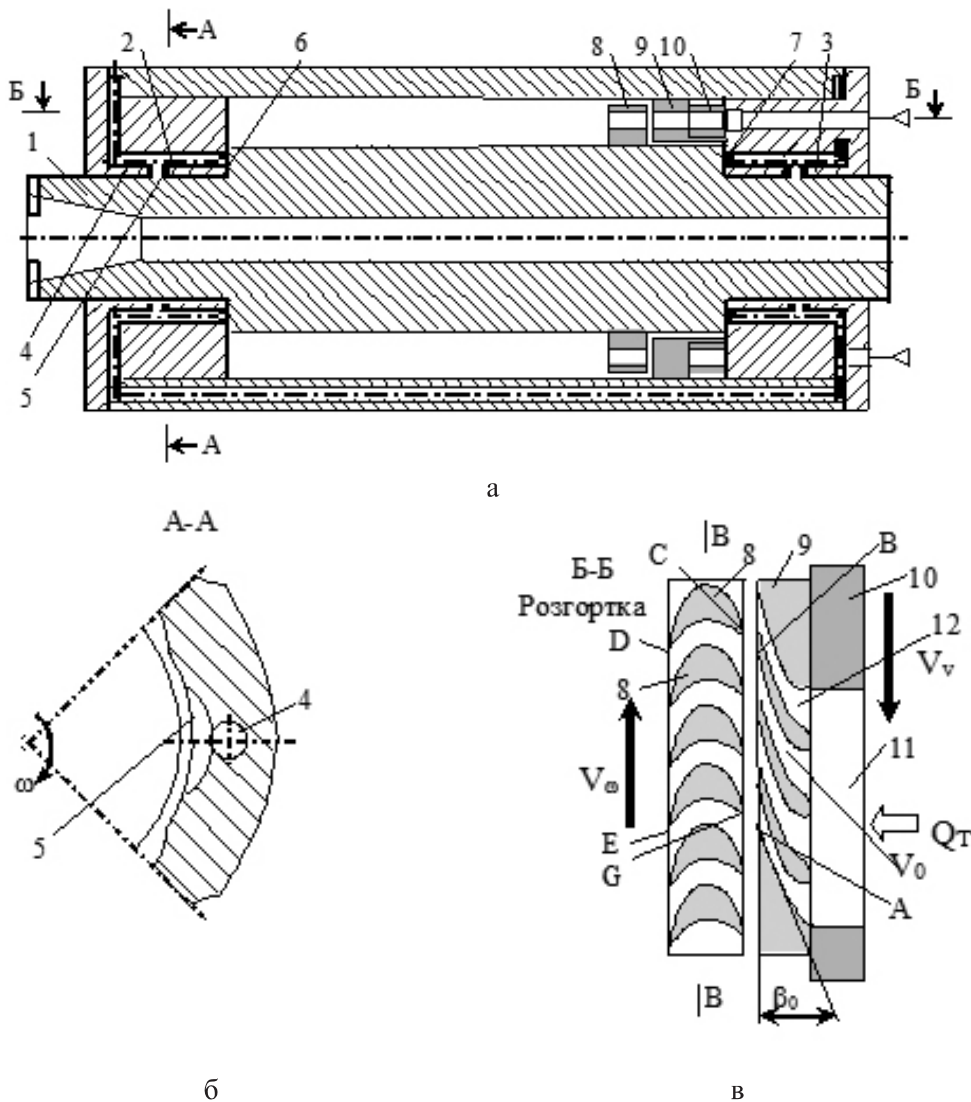


Рисунок 1 — Конструктивна схема високообертового шпindelного вузла з пневмотурбінним приводом:  
 а – діаметральний перетин шпindelя; б – перетин перпендикулярний вісі, на якому показано дросель аеростатичного підшипника; в – розгортка перетину турбіни та напрямного апарата

результатів розрахунків та відсутність аналітичного узагальнення особливостей течії. Це особливо стосується розрахунку струменевих течій в малорозмірних турбінах із наявністю значних градієнтів швидкості на межах струменевих потоків.

Аналіз літературних джерел свідчить, що до невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься дослідження особливостей розповсюдження малорозмірних струменевих потоків обмежених розмірів у пневмотурбінному приводі шпindelя та встановлення особливостей взаємодії потоків із лопатками турбіни, що супроводжується утворенням вторинних вихрових течій.

Мета досліджень — розроблення ефективного шпindelного вузла з пневмотурбінним приводом із врахуванням особливостей течії в малорозмірних струменевих потоках кінцевих розмірів, які мають місце в турбіні і напрямному апараті. Для досягнення мети поставлено і вирішено задачі розробки схемного

і конструктивного рішення шпindelного вузла з турбінним приводом та встановлення закономірностей течії малорозмірних струменевих потоків кінцевих розмірів у проточній частині напрямного апарата і турбіни.

### Виклад основного матеріалу досліджень

Конструктивне рішення розробленого шпindelного вузла та якісні особливості течії в турбіні.

На основі проведених досліджень розроблено інноваційне схемне і конструктивне рішення високообертового шпindelного вузла з високою несучою здатністю аеростатичних опор і регульованим пневмотурбінним приводом. Конструктивне рішення враховує особливості робочих процесів течії в аеростатичних підшипниках та пневмотурбінному приводі. Розроблений шпindel має компактну конструкцію і забезпечує обертання інструменту з необхідною частотою.

Робота шпинделя визначається особливостями течії в малорозмірних струменевих потоках кінцевих розмірів, що виникають у міжлопатковому просторі турбіни.

Шпиндельний вузол на аеростатичних підшипниках з пневмотурбінним приводом включає шпиндель 1, який встановлено на радіальних аеростатичних підшипниках 2 і 3 (рисунок 1, а).

Конструктивне рішення забезпечує компенсацію інтенсивних гіроскопічних крутних моментів, які виникають при просторовому переміщенні шпинделя [8].

Повітря до радіальних аеростатичних підшипників шпинделя підводиться по каналах 4, а дроселі підшипників утворені канавками 5 (рисунок 1, б). Для сприйняття осьових зусиль шпиндель має осьові аеростатичні підшипники 6 і 7 (рисунок 1, а). Обертання шпинделя забезпечується турбінним приводом, який має турбіну 8 і напрямний апарат 9. Регулювання подачі повітря в напрямний апарат здійснюється втулкою 10. Зміщення втулки 10 у тангенціальному напрямку (по стрілці  $V_v$ ) змінює положення серпоподібного отвору 11 відносно отворів сопел 12 та відповідно перекриває отвори частини сопел (рисунок 1, в).

При розробці схемного рішення шпинделя встановлені закономірності течії у малорозмірних струменевих потоках у проточній частині турбіни. Течія повітря у проточній частині напрямного апарата та турбіни визначає крутний момент шпинделя, швидкість його обертання та параметри шуму і вібрацій. Закономірності течії малорозмірних струменевих потоків кінцевих розмірів досліджені числовими методами та за допомогою розроблених аналітичних моделей.

Напрямний апарат турбіни має кілька сопел 12, кількість яких регулюється у відповідності із необхідною потужністю турбінного привода. На виході сопел формується потік повітря, форма якого відповідає кільцевому сектору. Сопла 12 виконано таким чином, що формують на виході профіль швидкостей частинок повітря, близький до рівномірного. При цьому потік направлений під кутом  $\beta_0 \approx 20^\circ$  до торця турбіни.

Потік повітря з напрямного апарата проходить через турбіну та спричиняє її обертання. Згідно умови нерозривності можна вважати, що витрата повітря на виході турбіни дорівнює витраті на вході  $Q_T$ .

Розглянемо контрольний об'єм, обмежений криволінійним контуром ABCDEG. У перетині він має вигляд кільцевого сектора. В кожному перетині В-В, перпендикулярному осі турбіни витрата повітря буде однаковою і дорівнюватиме  $Q_T$ . Тому проекція середньої швидкості повітря на вісь турбіни  $V_n$  на вході буде однаковою і визначитиметься залежністю

$$V_n = V_0 \sin \beta_0 ,$$

де  $V_n$  — швидкість повітря в ортогональному перетині сопла.

При русі повітря криволінійними каналами між лопатками турбіни має місце гальмування потоку в напірній

частині лопатки (область  $M_T$ ) і збільшення швидкості течії на тильній частині лопатки (область  $M_p$ ) (рисунок 2).

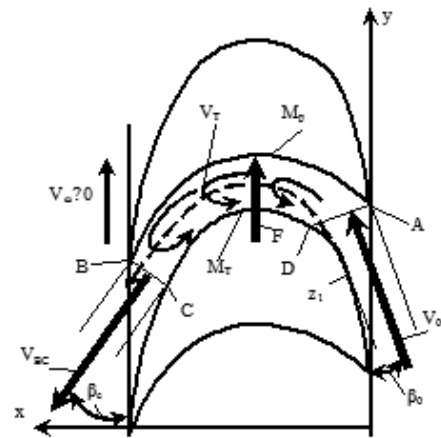


Рисунок 2 — Схема течії повітря у міжлопатковому каналі турбіни при незначних (нульових) частотах обертання

Пневмотурбінний привод забезпечує роботу шпинделя при різних моментних навантаженнях. Максимальний крутний момент досягається при повільному обертанні шпинделя. При цьому окружна швидкість турбіни

$$V_{\omega} = \omega r \approx 0 ,$$

де  $\omega$  — кутова швидкість обертання,  $r$  — середній радіус проточної частини (міжлопаткового простору).

При повільному обертанні шпинделя зміщення лопаток відносно потоку за час проходження повітря між лопатками є незначним і схема течії відповідає руху потоку в криволінійному каналі.

Для наближеного розрахунку зусилля  $F$ , що діє з боку потоку повітря на турбіну використано теорему імпульсів [9]. У проекціях на вісь  $y$ , яка направлена паралельно колій швидкості  $V_{\omega}$ , рівняння рівноваги контрольного об'єму повітря ABCD має вигляд

$$F = \rho V_0^2 S_{AD} \cos \beta_0 + \rho V_{BC}^2 S_{BC} \cdot \cos \beta_c , \quad (1)$$

де  $S_{AD}$ ,  $S_{BC}$  — площі перетину потоку на ділянках AD і BC відповідно;  $V_{BC}$  — середня швидкість частинок повітря в перетині BC,  $\beta_c$  — кут між середньою швидкістю потоку і торцем турбіни на виході.

Для уточнення параметрів, які входять до формули (1), проведено числові розрахунки течії повітря у міжлопатковому просторі турбіни.

#### Дослідження закономірностей течії у турбіні числовими методами

Течія повітря у турбіні характеризується значною складністю. Визначення особливостей течії проведено на основі числових розрахунків гідродинамічних параметрів течії. Для цього використано стандарні процедури розрахунку параметрів течії методом кінцевих елементів, реалізовані в пакеті ANSYS. Виконано розбивку області

течії на кінцеві елементи та задані крайові умови. Визначено гідродинамічні параметри течії повітря в міжлопатковому просторі. У результаті розрахунків на ЕОМ встановлено, що рівномірний потік повітря, який спливає на турбіну, деформується. У її проточній частині має місце нерівномірний розподіл швидкостей (рисунок 3).

У вихідному перетині міжлопаткового простору (перетин ВС) має місце потік повітря, близький до рівномірного. На виході з турбіни спостерігаються вихрові відривні явища із хаотичними змінами вектора швидкості. Відповідно на виході потоку із турбіни спостерігається збурення течії, яке проявляється у нерівномірності потоку на виході.

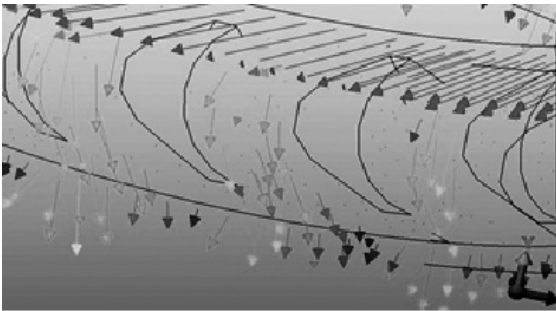


Рисунок 3 — Результати розрахунку векторного поля швидкостей течії у міжлопатковому просторі турбіни при незначній швидкості її обертання

Складне просторове поле швидкостей в міжлопатковому просторі є наслідком просторового переміщення частинок повітря по складних траєкторіях (рисунок 4).

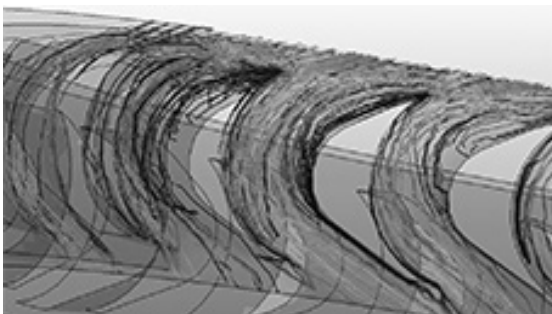


Рисунок 4 — Траєкторії руху частинок повітря у міжлопатковому просторі турбіни

Течія повітря супроводжується відривними явищами на тильних сторонах лопаток. При цьому виникають локалізовані відривні зони  $z_1, z_2, z_3$ . Має місце переміщення частинок повітря із області високого тиску  $T_1$  на напірній стороні лопатки в область низького тиску  $z_1$  на тильній стороні лопатки. Переміщення частинок повітря проявляється у наявності траєкторій  $S_1$ , що направлені з напірної частини лопатки до її тильної сторони. Також мають місце траєкторії частинок  $S_2$ , орієнтовані від тильної до напірної сторони лопатки. Для уточнення закономірностей нерівномірності течії проведено низку розрахунків течії (рисунок 5).

Встановлено особливості утворення відривних зон  $z_1$ , характер зміни траєкторій циркуляційного руху  $S_1$  та  $S_2$ , а також кут  $\beta_e = 32-37^\circ$ . Це дозволяє визначити зусилля, що діє на лопатку згідно з формулою (1).

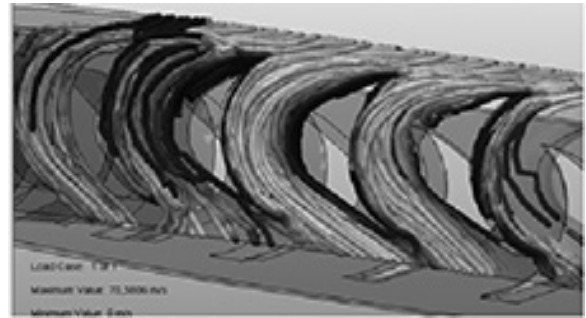
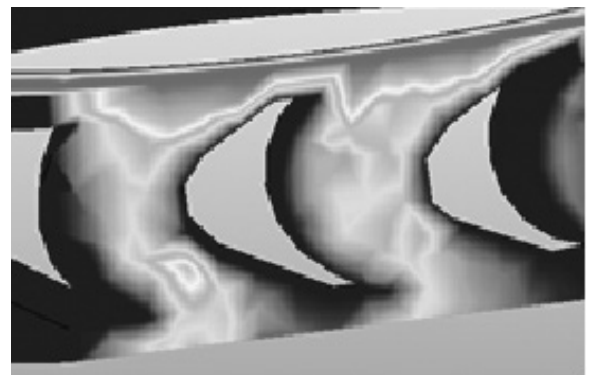
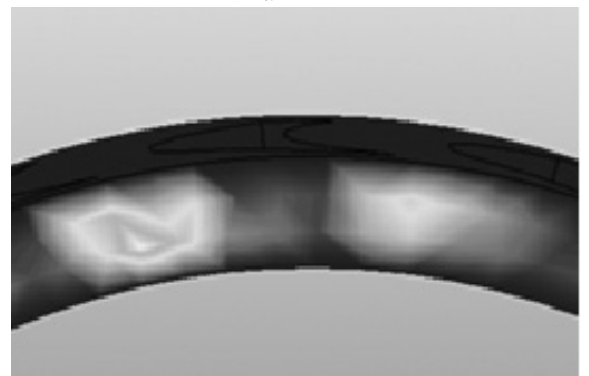


Рисунок 5 — Розрахунок траєкторій руху частинок повітря в міжлопатковому просторі із деталізованим виводом результатів

Для визначення розподілу швидкостей проведено обчислення на ЕОМ модуля швидкості в області течії (рисунок 6).



а



б

Рисунок 6 — Результати обчислень розподілу модуля швидкості в міжлопатковому просторі турбіни: а – області рівних значень модуля швидкості в перетині, паралельному діаметральному перетину; б – розподіл швидкості в перетині, перпендикулярному осі турбіни

В результаті аналізу розрахункових даних встановлено, що максимальні значення швидкостей спостерігаються на вході в міжлопатковий простір (область  $W_1, W^2$ ). При цьому

області максимуму модуля швидкості  $Q_1, Q_2$  мають місце в центральних частинах каналів між лопатками. Вони охоплюють близько 80% поперечного перетину каналу.

Значення модуля швидкості в областях мало відрізняються від швидкості  $V_0$  на вході до міжлопаткового простору.

Із результатів розрахунків випливає, що на напірній поверхні лопатки середня швидкість частинок повітря зменшується вдвічі у порівнянні із швидкістю спливаючого потоку. Це обумовлює зростання тиску на поверхні лопатки.

На виході потоку із турбіни (області P1, P2) середнє значення швидкості у перетині незначним чином (не більше 5%) відрізняється від швидкості у перетині на вході до міжлопаткового простору. Відтак у формулі (1) можна прийняти  $V_{BC} \approx 0,98V_0$ . Відповідно для обчислення зусилля при незначній частоті обертання турбіни маємо формулу

$$F = \rho V_0^2 (S_{AD} \cos \beta_0 + 0.95 S_{BC} \cos \beta_e) \quad (2)$$

В результаті числових розрахунків встановлено особливості розподілу тиску в міжлопатковому просторі турбіни (рисунк 7).

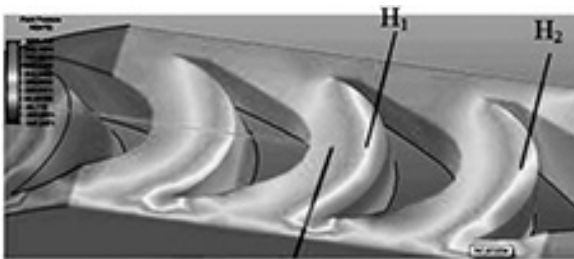


Рисунок 7 — Розрахунок поля статичного тиску в міжлопатковому просторі турбіни

Області підвищеного тиску локалізуються в тонких шарах  $H_1, H_2$  біля напірних поверхнь лопаток. На тильних сторонах лопаток виникають області зниженого тиску складної конфігурації.

Проведено визначення статичного тиску в окремих точках області течії. Встановлено, що максимум тиску має місце на крайці лопатки у зоні гальмування потоку (рисунк 8).

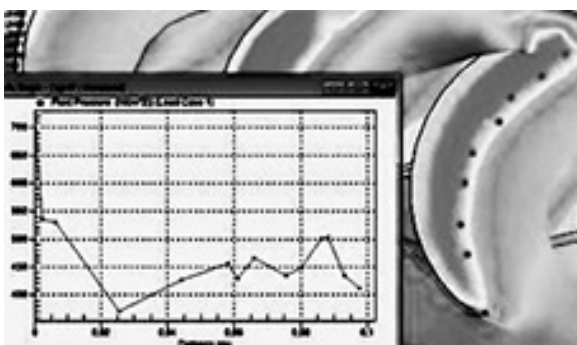


Рисунок 8 — Розрахункові зміни тиску в низці послідовних точок у міжлопатковому просторі турбіни

Після гальмування потоку на крайці тиск повітря різко падає. У подальшому спостерігаються періодичні зміни тиску, обумовлені наявністю вторинних течій.

У результаті розрахунків встановлено особливості течії у міжлопатковому просторі турбіни. Для їх узагальнення проведено теоретичні дослідження з метою виявлення закономірностей вторинних течій у турбіні.

#### Встановлення закономірностей вторинних течій у міжлопатковому просторі турбіни

У результаті розрахунків на ЕОМ встановлені лінії течії і траєкторії руху частинок повітря.

Показано, що в проточній частині турбіни виникають специфічні вихрові вторинні течії. Вони мають вигляд двох вихрових шнурів, розташованих у міжлопатковому просторі турбіни (рисунк 9).

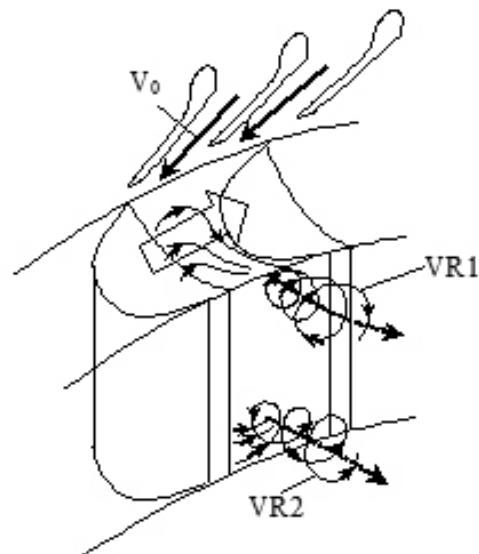


Рисунок 9 — Принципова схема формування вихрових вторинних течій в міжлопатковому просторі турбіни

Унаслідок перепаду тиску на напірному і тильному боках лопаток виникають вторинні течії, які формують вихрові шнури та . Закономірності виникнення вихрових шнурів встановлено шляхом аналізу течії в областях біля твердих стінок, де швидкість частинок повітря близька до нуля.

У результаті числових розрахунків течії на ЕОМ встановлено, що інтенсивність вторинних течій набагато менша інтенсивності основного потоку. Тому для їх теоретичного узагальнення запропоновано спеціальний метод. Він полягає у визначенні закономірностей відносної вторинної течії у відхиленнях від основної стратифікованої течії повітря в міжлопатковому просторі. Позначимо відхилення проєкцій швидкості вторинної течії  $V_x, V_y, V_z$ . Дані проєкції визначають повільний циркуляційний рух рідини.

На краях напірної та тильної сторін лопаток швидкість частинок повітря близька до нуля. Тому на краях міжлопаткового простору маємо сингулярні області течії. Для їх дослідження використано спеціальний метод аналізу нелінійних диференціальних рівнянь із областями сингулярності [10].

В сингулярній області вектор швидкості частинок повітря  $\vec{v} \cong 0$ , а відповідно проекції швидкостей на осі координат  $x, y, z$ :

$$v_x \cong v_y \cong v_z \cong 0$$

У загальному випадку рівняння лінії течії просторового руху частинок повітря мають вигляд

$$\frac{d}{dt} = v_x(x, y, z), \quad \frac{d}{dt} = v_y(x, y, z), \quad \frac{d}{dt} = v_z(x, y, z). \quad (3)$$

Проекції швидкостей є функціями трьох змінних  $x, y, z$ . Розкладемо проекції швидкості (3) в ряд Тейлора. Обмежуючись лише лінійними складовими, одержимо

$$\begin{aligned} v_x &= \varepsilon \left. \frac{\partial v_x}{\partial x} \right|_0 x + \varepsilon \left. \frac{\partial v_x}{\partial y} \right|_0 y + \varepsilon \left. \frac{\partial v_x}{\partial z} \right|_0 z + o(\varepsilon) \\ v_y &= \varepsilon \left. \frac{\partial v_y}{\partial x} \right|_0 x + \varepsilon \left. \frac{\partial v_y}{\partial y} \right|_0 y + \varepsilon \left. \frac{\partial v_y}{\partial z} \right|_0 z + o(\varepsilon) \\ v_z &= \varepsilon \left. \frac{\partial v_z}{\partial x} \right|_0 x + \varepsilon \left. \frac{\partial v_z}{\partial y} \right|_0 y + \varepsilon \left. \frac{\partial v_z}{\partial z} \right|_0 z + o(\varepsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  — нескінченно мала величина.

Складемо матрицю коефіцієнтів, які входять в праві частини даних залежностей (4). Вона має вигляд

$$K = \begin{vmatrix} \left. \frac{\partial v_x}{\partial x} \right|_0 & \left. \frac{\partial v_x}{\partial y} \right|_0 & \left. \frac{\partial v_x}{\partial z} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial v_y}{\partial x} \right|_0 & \left. \frac{\partial v_y}{\partial y} \right|_0 & \left. \frac{\partial v_y}{\partial z} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial v_z}{\partial x} \right|_0 & \left. \frac{\partial v_z}{\partial y} \right|_0 & \left. \frac{\partial v_z}{\partial z} \right|_0 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Визначимо тензор деформацій рухомого середовища (повітря) [9] в межах сингулярної області

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial V_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Розглянемо течію повітря в сингулярній області. Прийmemo, що дана течія за виключенням окремих ділянок в центрі вихрового шнура є безвихровою. Для такої течії

$$\text{rot} \vec{V} = 0 \quad (7)$$

Відповідно (7) між проекціями швидкостей наявні співвідношення

$$\frac{\partial V_z}{\partial y} = \frac{\partial V_y}{\partial z}, \quad \frac{\partial V_x}{\partial z} = \frac{\partial V_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial V_y}{\partial x} = \frac{\partial V_x}{\partial y}. \quad (8)$$

Підставивши залежності (8) в формулу (6) для визначення складових тензора швидкостей деформацій, одержимо матрицю тензора швидкостей деформацій у вигляді

$$\dot{S}_{\omega=0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_x}{\partial x} & \frac{\partial V_x}{\partial y} & \frac{\partial V_x}{\partial z} \\ \frac{\partial V_y}{\partial x} & \frac{\partial V_y}{\partial y} & \frac{\partial V_y}{\partial z} \\ \frac{\partial V_z}{\partial x} & \frac{\partial V_z}{\partial y} & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Із порівняння матриць, що входять у праві частини залежностей (5) і (9) випливає, що матриця  $K$  відповідає матриці компонент тензора швидкостей деформацій просторового безвихрового ( $\text{rot} \vec{V} = 0$ ) руху повітря.

Для визначення головних компонент тензора, що відповідають власним значенням матриці  $K$  складемо характеристичне рівняння

$$\det |K - \lambda E| = 0 \quad (10)$$

де  $E$  — одинична матриця,  $\lambda$  — власні значення матриці  $K$ .

Розкривши детермінант у лівій частині характеристичного рівняння (10) отримаємо

$$\lambda^3 + a\lambda^2 + b\lambda + c = 0. \quad (11)$$

Коефіцієнти рівняння (11) не залежать від вибору системи координат і є інваріантами тензора швидкостей деформацій (9) (першого  $I_1$ , другого  $I_2$  і  $I_3$  третього), де

$$a = -I_1, \quad b = I_2, \quad c = -I_3.$$

Складемо комплекс (дискримінант) кубічного рівняння (11) у вигляді

$$D = (9c - ab)^2 - (6b - 2a^2)(6ac - 2b^2)$$

Виконаємо аналіз власних значень матриці (5), які співпадають із головними компонентами тензора швидкостей деформацій (9).

Розглянемо випадок, коли одне із власних значень матриці буде дійсним, а два інших — комплексними спряженими. Прийmemo, що перше власне значення ( $\lambda_1$ ) є дійсним, а два інших  $\lambda_2$  і  $\lambda_3$  — комплексні спряжені. При цьому маємо три варіанти. Перший:  $\lambda_1 > 0$  при  $c < 0$ , або  $I_3 > 0$ . Якщо  $c = I_3 = 0$ , то  $\lambda_1 = 0$ . Якщо третій інваріант  $I_3 < 0$ ,  $c > 0$  то  $\lambda_1 < 0$ .

В розглянутому варіанті можливі випадки

$$\text{Re}(\lambda_1, \lambda_2) > 0, \quad \text{Re}(\lambda_1, \lambda_2) = 0, \quad \text{Re}(\lambda_1, \lambda_2) < 0.$$

При чисто уявних власних значеннях маємо особливу область типу центр (фокус), який описує ізольований вихор. Даний центр є стійким або нестійким в залежності від знака  $\lambda_1$ .

Лінії течії для даної сингулярної області є спірале подібними (рисунок 10).

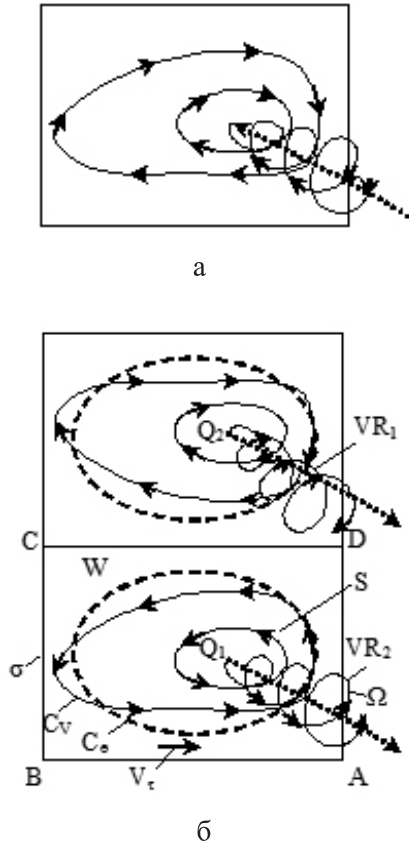


Рисунок 10 — Сингулярні області типу центра (фокуса):  
 а) течія у просторовому вихростоку (фізично нереальна);  
 б) схема течії в парі вихроджерел відповідна течії у міжлопатковому просторі турбіни

Встановлено, що в міжлопатковому просторі виникають дві вихрові зони з центрами  $O_1$  та  $O_2$ . Вони утворюють симетричну вихрову систему, яка складається із пари вихорів. Радіальні розміри вихорів є близькими. Тому можна прийняти, що площі вихрових зон  $\sigma$  та їх об'єми  $W$  є близькими. Вихрові зони утворені вихровими трубками, які мають криволінійну конфігурацію відповідно контуру  $C_v$ . Форма даного контура близька до еліптичного  $C_e$ . Площа вихрової трубки близька до площі вихрової зони  $\sigma$ .

Для оцінки інтенсивності завихрення використано відому теорему про ротор [9], яка пов'язує об'ємний інтеграл ротора швидкості із поверхневим інтегралом векторного добутку орієнтованого елемента поверхні на вектор швидкості частинок повітря на межі контрольної поверхні і записується у вигляді

$$\Omega = \iiint_W \text{rot } \vec{V} \, dV = \iint_\sigma d\vec{\sigma} \times \vec{V}, \quad (12)$$

де  $\vec{V}$  — вектор швидкості,  $W$  — контрольний об'єм,  $\sigma$  — поверхня, яка обмежує контрольний об'єм.

В якості контрольного об'єму взято половину висоти міжлопаткового простору (ділянка ABCD на рисунку 10). Обчислення правої частини формули (12) здійснено з використанням розрахункових значень швидкості у вихідному перетині міжлопаткового простору (рисунок 3). В результаті розрахунків визначено об'ємний інтеграл ротора швидкості  $\Omega$  в половині міжлопаткового простору (рисунок 11).

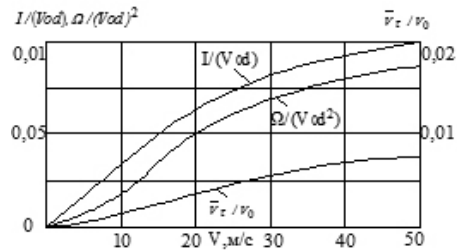


Рисунок 11 — Узагальнені результати обчислень параметрів вихрової течії у міжлопатковому просторі турбіни

Об'ємний інтеграл ротора швидкості у міжлопатковому просторі зростає із збільшенням витрати повітря через турбіну (швидкості  $V$ ).

В міжлопатковому просторі формуються дві вихрові трубки. Інтенсивність вихрової трубки визначається як потік ротора у вихідному перетині трубки

$$I = \iint_S \text{rot}_n \vec{V} \, ds.$$

Обчислення даного інтеграла здійснено інтегруванням точкових значень ротора швидкості у перетині міжлопаткового простору на виході. Встановлено, що потік ротора вихрового шнура на виході турбіни зростає зі зростанням витрати повітря через турбіну (швидкості потоку  $V$ ). При певних швидкостях частинок повітря  $V=35—50$  м/с інтенсивність росту даних параметрів зменшується. Це пояснюється збільшенням сил опору при інтенсивному вихровому русі.

На основі теореми Стокса визначено циркуляцію швидкості по контуру  $C_v$  вихрової трубки.

Циркуляція швидкості по контуру  $\Gamma_{C_v}$

$$\Gamma_{C_v} = \oint_{C_v} \vec{V}_\tau \, dL = \iint_S \text{rot}_n \vec{V} \, ds = \mathfrak{I}.$$

Встановлено, що контур вихрової трубки  $C_v$  близький до еліпса  $C_e$ . При цьому визначено середню по периметру тангенціальну швидкість вторинної течії  $\vec{V}_\tau$ . Відповідно

$$\vec{V}_\tau = I / L,$$

де  $L$  — довжина еліптичного контуру вихрової трубки.

Проведено обчислення середньої по периметру швидкості в залежності від витрати повітря через турбіну (швидкості потоку  $V$ ). Середня тангенціальна швидкість

(рисунок 11) зростає при збільшенні витрати повітря. При швидкостях набігаючого потоку повітря  $V \geq 30$  м/с ступінь зростання тангенціальної швидкості знижується.

## Висновки

1. На основі числових розрахунків поля течії повітря в міжлопатковому просторі турбіни встановлено, що при значних моментних навантаженнях, що відповідає повільному обертанню турбіни, кут виходу потоку із міжлопаткового простору складає 1,5–1,6 кута входу ( $20^\circ$ ) і практично лінійно залежить від частоти обертання, збільшуючись із зростанням окружної швидкості турбіни.

2. Встановлено, що вихрові течії, що відбуваються у міжлопатковому просторі турбіни в області сингулярності поля швидкостей, де виникає додатковий циркуляційний рух повітря, який має кілька різновидів, що залежать від величини компонент тензора швидкостей деформацій. Вихрові вторинні течії у міжлопатковому просторі виникають при умові наявності двох чисто уявних власних значень матриці компонент тензора швидкостей деформацій. Дана сингулярна область відповідає стійкому центру у вигляді вихроджерела.

3. У міжлопатковому просторі пневмотурбіни виникає складна течія повітря, яка супроводжується формуванням парного вихора, інтенсивність якого визначена у вигляді об'ємного інтеграла ротора швидкості, що зростає в залежності від швидкості натікаючого потоку повітря. Аналогічне зростання має місце для інтенсивності вихрових трубок та середньої по периметру вихрової трубки тангенціальної швидкості частинок повітря.

## Література

1. Бойко, А.В. Оптиміальне проектування турбомашин (основи теорії, розрахунок, експеримент) / А.В. Бойко. — Харків: НТУ «ХПІ», 2011. — 384 с.

2. Колычев, В.А. Гидродинамические характеристики элементов проточной части и их влияние на энергетические показатели радиально осевой гидротурбины / В.А. Колычев, И.И. Тыньянова, К.А. Миронов // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2010. — № 4 / 7 (46). — С. 3—15.

3. Линник, А.В. Современный уровень и основные направления развития гидротурбостроения в Украине / А.В. Линник, В.Д. Хантов // Пробл. машиностроения. — 2010. — Т.13, № 1. — С. 11—18.

4. Ершов, С.В. Развитие комплекса программ расчета трехмерных течений вязкого сжимаемого газа в лопаточных аппаратах турбомашин / С.В. Ершов, В.А. Яковлев, А.И. Деревянко, М.Н. Гризун, Д.А. Козырец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». — 2011. — №5. — С. 25—32.

5. Русанов, А.В. Численное исследование и анализ рабочего процесса в проточной части осевой поворотнолопастной гидротурбины / А.В. Русанов, П.Н. Сухоребрий,

О.Н. Хорев, Д.Ю. Косьянов, Ю.В. Городецкий // Вісник НТУУ «ХПІ». — 2014. — №1(1044). — С. 125—135.

6. Потетенко, О.В. Анализ потерь энергии в высоконапорных радиально-осевых гидротурбинах, обусловленных характерными особенностями структуры потока в проточной части / О.В. Потетенко, В.Э. Дранковский, А.М. Гришин, Е.С. Крупа, А.А. Гулахмадов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». — 2012. — №7. — С. 151—159.

7. Русанов, А.В. Оценка возможности применения поворотных лопаток направляющего аппарата ступеней осевого и радиально-осевого типов ЦВД для регулирования режима работы паровой турбины К-325-23,5 / А.В. Русанов, А.И. Косьянова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». — 2012. — №7. — С. 39—48.

8. Струтинський, С.В. Газодинамічні процеси у вузлах високообертового пневмошпинделя на аеростатичних опорах із турбінним приводом, призначеного для застосування в багатокординатному технологічному обладнанні з паралельними кінематичними структурами / С.В. Струтинський // Вісн. Нац. техн. ун. «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. — 2015. — №3 (1112). — С. 100—111.

9. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1973. — 847 с.

10. Блэкьер, О. Анализ нелинейных систем / О. Блэкьер. — М.: Мир, 1969. — 400 с.

## References

1. Boyko, A.V. Optimalne proektuvannya turbomashin (osnovi teorii, rozrakhunok, eksperiment) / A.V. Boyko. — Kharkiv: NTU «KHPI», 2011. — 384 s.

2. Kolychev, V.A. Gidrodinamicheskie kharakteristiki elementov protochnoi chasti i ikh vliyanie na energeticheskie pokazateli radialno-osevoi gidroturbiny / V.A. Kolychev, I.I. Tynyanova, K.A. Mironov. // Skhidno-Evropetskii zhurnal peredovikh tekhnologiy. — 2010. — № 4/7 (46). — S. 3 — 15.

3. Linnik, A.V. Sovremennyyi uroven i osnovnye napravleniia razvitiia gidroturbostroeniya v Ukraine / A.V. Linnik, V.D. Khantov // Probl. mashinostroeniya. — 2010. — T.13, № 1. — S. 11 18.

4. Ershov, S.V. Razvitie kompleksa programm rascheta trekhmernykh techenii v yazkogo szhimaemogo gaza v lopatochnykh apparatakh turbomashin / S.V. Ershov, V.A. Yakovlev, A.I. Derevyanko, M.N. Grizun, D.A. Kozyrec. — Visnyk NTU «KHPI». Seriya «Energetichni ta teplotekhnichni procesy ustakuvannya». — 2011. — №5. — S. 25— 32.

5. Rusanov, A.V. Chislennoe issledovanie i analiz rabochego processa v protochnoi chasti osevoi povorotno-lopastnoi gidroturbiny / A.V. Rusanov, P.N. Suhorebry, O.N. Horev, D. Yu. Kosyanov, Yu. V. Gorodecky // Visnyk NTUU «KHPI». — 2014. — №1(1044). — S. 125 — 135.



6. Potetenko, O.V. Analiz poter energii i vysokonapornykh radialno-osevykh gidroturbinakh obuslovlennykh kharakternymi osobennostiami struktury potoka v protochnoi chasti / O.V. Potetenko, V.J. Drankovsky, A.M. Grishin, E.S. Krupa, A.A. Gulakhmadov // Visnyk NTU «KHPI». Seriya «Energetychni ta teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya». — 2012. — №7. — S. 151—159.

7. Rusanov, A.V. Otsenka vozmozhnosti primeneniya povorotnykh lopatok napravliayushchego aparata stupeni oseвого i radialno-oseвого tipov CVD dlya regulirovaniya rezhima raboty parovoi turbiny K—325—23,5 / A.V. Rusanov, A.I. Kosyanova // Visnyk NTU «KHPI». Seriya «Energetychni ta teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya». — 2012. — №7. — S. 39 — 48.

8. Strutinsky, S.V. Gazodinamichni protsesi u vuzlakh visokoobertovogo pnevmoshpindelya na aerostatichnikh oporakh iz turbinnim privodom, pryznachenogo dlya zastosuvannya v bagatokoordinatnomu tekhnologichnomu obladdanni z paralelnimi kinematichnimi strukturami / S.V. Strutinsky // Visnyk Nacionalnogo tekhnichnogo universitetu «HPI». Seriya: Hidravlichni mashini ta gidroагрегати. — 2015. — №3(1112) — s. 100—111.

9. Loitsiansky, L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza / L.G. Loitsiansky / M.: Nauka, 1973. — 847 s.

10. Blaker, O. Analiz nelineinykh sistem / O. Blaker / M.: Mir, 1969. — 400 s.

Надійшла 7.06.2016 року

УДК 621.224

## Разработка высокооборотного шпиндельного узла и определение особенностей течения в струйных потоках, возникающих в его пневмотурбинном приводе

С.В. Струтинський

Цель. Разработка эффективного шпиндельного узла с пневмотурбинным приводом с учетом особенностей течения в малоразмерных струйных потоках конечных размеров, которые имеют место в турбине и направляющем аппарате.

Методы исследования. Применены теоретические методы исследования, основанные на расчете на ЭВМ параметров течения в межлопаточном пространстве турбины. Разработан метод определения характеристик вторичных течений путем рассмотрения сингулярных областей течения в межлопаточном пространстве турбины и соответствующем упрощении уравнений гидромеханики.

Результаты исследования. Разработана инновационная конструкция шпинделя на аэростатических опорах.

Описаны качественные особенности процессов течения воздуха в пневмотурбинном приводе. Обоснована расчетная схема и краевые условия численного расчета течения в межлопаточном пространстве турбины. Проведены расчеты траекторий движения частиц воздуха, поля скоростей и статического давления в проточной части турбины. Установлены особенности течения, в том числе наличие циркуляционных и отрывных областей. На основе численных расчетов обоснована схема возникновения вторичных течений воздуха, которая основана на анализе сингулярных решений уравнений гидромеханики. Установлены условия возникновения вихревых вторичных течений в межлопаточном пространстве турбины. Определены количественные характеристики вторичных течений.

Выводы. Установлено, что вихревые течения порождаются в межлопаточном пространстве турбины в области сингулярности поля скоростей, где возникает дополнительное циркуляционное движение воздуха, которое имеет несколько разновидностей, зависящих от величины компонент тензора скоростей деформаций. Вихревые вторичные течения в межлопаточном пространстве возникают при условии наличия двух чисто мнимых собственных значений матрицы компонент тензора скоростей деформаций. Данная сингулярная область соответствует устойчивому центру в виде вихреисточника. В межлопаточном пространстве пневмотурбины возникает сложное течение воздуха, которое сопровождается формированием парного вихря, интенсивность которого определена в виде объемного интеграла ротора скорости, который растет в зависимости от скорости натекающего потока воздуха. Аналогичный рост имеет место для интенсивности вихревых трубок и средней по периметру вихревой трубки тангенциальной скорости частиц воздуха.

*Ключевые слова:* пневмошпиндель, турбина, течение воздуха, численные расчеты, вторичные течения, характеристики.

UDC 621.224

## Development of the high-speed spindle and identification of the jet stream flow features, arising in its air turbine

S.V. Strutinsky

Goal. Development of effective spindle unit with pneumatic drive that considered the specific flow in the small finite size jet streams that take place in the turbine and the guide unit.

Research methods. The theoretical methods of research that are based on computer calculations of flow parameters in the inter-blade turbine space were applied. We developed

the method of determining of secondary flow characteristics by considering singular regions flow in the inter-blade turbine space and simplifying the relevant fluid mechanics equations.

Research results. Developed an innovative design of pneumatic spindle with aerostatic bearings. Were described the qualitative features of air flow processes in the pneumatic turbine. Grounded the design scheme and the boundary conditions of numerical calculation of flow in the space between turbine blades . The trajectories of air particles and velocity field and static pressure in the flow part of turbine were calculated. The flow features, including the availability of the circulation areas and tear-off areas were installed. Based on the numerical calculations the scheme arising of secondary flows that based on analysis of singular solutions of the fluid mechanics equations was grounded. The conditions of arising of the secondary vortex flows in the inter-blade turbine space were established. The quantitative characteristics of secondary flows were determined.

Conclusions. Found that the vortex flows are generated in the inter-blade turbine space in the singularity velocity field where is an additional circulating air movement, which has several varieties, depending on the magnitude of velocity deformation tensor components. The secondary vortex flows in the inter-blade space are appearing in case of availability of two purely imaginary eigenvalues of matrix deformation velocity tensor components. This singular region corresponds to a stable center as a vortex source. The complex air flow that is appearing in the inter-blade space of turbine, accompanied by the formation of vortex pair, whose intensity is defined as the volume integral of rotor of the speed, that increases depending on the air flow speed. A similar growth is observed for the intensity of the vortex pipe and for a center by perimeter tube of vortex tangential velocity of air particles.

*Keywords: pneumatic spindle, turbine air flow, numerical calculations, secondary flow characteristics.*