НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
”ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Розова Людмила Вікторівна

УДК 539.4: 621.6

СУМІСНИЙ АНАЛІЗ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ТА ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНІВ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ З ГАЗОВИМ ЗМАЩЕННЯМ РОТОРІВ ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРІВ

Спеціальність 05.02.09 - динаміка та міцність машин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків - 2004

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
Роговий Євген Дмитрович,
ВАТ "Сумське НВО ім.М.В. Фрунзе", м. Суми,
перший заступник голови правління.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Марцинковський Володимир Альбінович,
Сумський державний університет, м. Суми,
завідувач кафедри загальної механіки
та динаміки машин;

кандидат технічних наук,
Ромашов Юрій Володимирович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут", м. Харків,
доцент кафедри теорітичної механіки.

Провідна установа:

Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків.

Захист відбудеться ***14.04. 2004 р.*** о ***16 год.*** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий ***11.03.2004 р.***

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.10 Бортовой В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ущільнювальна техніка в компресоробудуванні України традиційно дістала великий розвиток ще з 50-х років минулого сторіччя і займала передові позиції в машинобудуванні. З удосконалюванням і здешевленням нових технологій виготовлення гідравлічні ущільнення поступово заміняються газодинамічними. Однак аналіз стану проблеми ефективного проектування такого типу ущільнень свідчить про те, що для більш широкого розповсюдження таких технічно складних і наукомістких вузлів, відсутня одна з основних умов успішного створення проекту в прийнятний термін з урахуванням конкретних режимів експлуатації. Цю умову можна сформулювати, як можливість проведення уточненого аналізу робочого процесу в газодинамічних торцевих ущільненнях (ГТУ), що дозволяє вірогідно оцінити правильність прийнятих конструктивних рішень. Такий аналіз роботи торцевого ущільнення дозволяє знизити кількість альтернативних варіантів конструкцій при проведенні експериментально-доводочних робіт.

Тенденцією розвитку сучасних методів проектування є її автоматизація за рахунок різнобічного застосування комп'ютерної техніки. Головним напрямком цієї тенденції є застосування комп'ютеризованого аналізу і синтезу робочих процесів, широке використання варіантних розрахунків, включаючи математичні методи оптимізації.

Необхідність нових автоматизованих методик розрахунку ГТУ та широкі можливості, що відкриваються для їх успішного створення в досить короткий термін у зв'язку з удосконалюванням чисельних алгоритмів, збільшенням обчислювальних можливостей комп'ютерної техніки й обумовлює актуальність теми даної роботи.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (НТУ “ХПІ”) згідно плану фундаментальної програми МОН України “Розробка теоретичних та експериментальних методів дослідження коливань та надійності складних роторних систем з метою збільшення їх ресурсу та зниження енергетичних затрат на виготовлення та експлуатацію” (№ Д.Р. 0100U001651), а також, згідно договору на створення науково-технічної продукції між НТУ “ХПІ” та ВАТ “Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе” (м.Суми) на 2001-2003 рр. “Розробка методик і дослідження перспективних вузлів і систем відцентрових компресорів ГПА” (№ Д.Р. 0196U022150).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є створення уточненої комплексної методики розрахунку ГТУ на основі аналізу сучасних математичних моделей і розрахункових методів, що дозволить скоротити обсяг експериментально-доводочних робіт і терміни їх проектування.

Поставлена мета визначає ряд основних *задач:*

- визначити двовимірний розподіл газодинамічного тиску в зазорі між кільцями ущільнення з урахуванням зміни температури і тепловиділення в газовому шарі;
- визначити деформований стан робочих кілець ущільнення від дії газодинамічного тиску в зазорі, газостатичного тиску на неробочих поверхнях кілець, сили дії пружин, нерівномірного нагрівання кілець ущільнення і виділення тепла в газовому шарі;
- вирішити сумісну задачу газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для ГТУ на основі спеціального ітераційного алгоритму;
- провести чисельний аналіз деформованого стану і витратних характеристик натурних конструкцій з метою з'ясування впливу окремих конструктивних параметрів на якісні показники ГТУ.

Об'єктом дослідження є деформації робочих кілець ущільнення з урахуванням умов експлуатації.

Предмет дослідження: зусилля і витратні характеристики ГТУ з урахуванням характеру розподілу газодинамічного тиску в робочих зазорах, виділення тепла в газовому шарі, нерівномірності нагрівання робочих кілець.

Методи дослідження: метод Бубнова-Гальоркіна в сполученні з методом скінчених елементів, варіаційні методи в сполученні з методом скінчених елементів, ітераційні методи вирішення нелінійних алгебраїчних систем рівнянь та їхні модифікації.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше отримано нелінійне рівняння газового змащення в частинних похідних з урахуванням зміни температури в припущенні лінійної залежності величини, зворотної коефіцієнту динамічної в'язкості від температури і тиску газу.

Математично обґрунтовано підхід прямого чисельного вирішення цього рівняння з використанням методу Бубнова-Гальоркіна в сполученні з методом скінчених елементів та формули Гріна для зниження порядку рівняння.

На основі рівняння енергії газу отримано рівняння теплопровідності з урахуванням виділення тепла в тонкому газовому шарі, обумовленого його в'язкістю та конвективним переносом тепла.

Вперше запропоновано ітераційний підхід для вирішення комплексної задачі визначення витрати газу через ущільнення з урахуванням деформування робочих кілець від впливу газодинамічного тиску, нерівномірного нагрівання робочих кілець і виділення тепла в газовому шарі, що складається з декількох вкладених модифікованих ітераційних циклів.

Практичне значення одержаних результатів. У результаті теоретичних досліджень розроблено і практично використано наступні алгоритми:

− алгоритм сумісного вирішення задачі теплопровідності для робочих кілець ущільнення і газового шару між ними;
− ітераційний алгоритм, що складається з декількох вкладених ітераційних циклів для вирішення комплексної задачі газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для ГТУ.

Запропоновані алгоритми реалізовано в спеціалізованому програмному комплексі, який впроваджено на ВАТ "Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе" (м.Суми) для аналізу перспективних проектів, що підтверджується актом про впровадження результатів роботи. Результати роботи також використовуються у навчальному процесі в НТУ "ХПІ" для студентів при виконанні курсових та дипломних робіт.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, викладені в дисертації, належать авторові. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати: розробка алгоритму вирішення окремих задач уточненого розрахунку ГТУ та ітераційного алгоритму сумісного вирішення цих задач, створення розрахункових програм, проведення чисельних досліджень для натурних конструкцій ущільнень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях: "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я", м. Харків, 2000 р., 2002 р., 2003 р.; "Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання", м. Зміїв, 2000 р; "Фізичні та комп′ютерні технології у народному господарстві", м. Харків, 2000 р.; "Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного і компресорного обладнання", м. Суми, 2002 р., на 8-му міжнародному симпозіумі "Споживачі-виробники компресорів і компресорного обладнання", м. Санкт-Петербург, 2002р. У повному обсязі робота доповідалася на розширеному науковому семінарі кафедри динаміки та міцності машин НТУ "ХПІ".

Публікації. По темі дисертації опубліковано 9 друкованих праць у спеціалізованих виданнях, серед яких 6 статей у фахових виданнях ВАК України, 1 стаття у збірнику, 1 стаття у працях міжнародної науково-технічної конференції, та 1 стаття у працях міжнародного симпозіуму.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, 1 додатку. Повний обсяг дисертації складає 160 сторінок, 56 ілюстрацій по тексту; 2 таблиці на 7 сторінках, 17 таблиць по тексту; 114 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 139 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовується актуальність теми, позначені мета та задачі дослідження і викладені основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі наведено опис газодинамічний торцевих ущільнень (ГТУ) відцентрових компресорів (рис.1) та їх принцип роботи. Зроблено огляд існуючих конструкцій ГТУ, області їхнього застосування. Сформульовано переваги газодинамічних ущільнень над гідродинамічними.

Ущільнювальна ступінь розглянутого в роботі ущільнення складається з двох робочих кілець, одне з яких обертається разом з валом компресора. Обертове кільце виготовляють звичайно з твердих матеріалів. На його ущільнювальній поверхні нанесені динамічні канавки, які у робочому стані створюють і підтримують тиск газу, що забезпечує зазор між ущільнювальними кільцями величиною 3-5 мкм (рис.2). Необертове кільце звичайно виготовляють з низькомодульних матеріалів.

Рис.1.Схема ГТУ. Рис.2.Конфігурація мікроканавок.

При розгляді основних етапів проектування показано, що точність розрахунку робочих процесів у ГТУ має вирішальне значення для одержання якісного проекту. Огляд існуючих методик розрахунку ГТУ, свідчить про те, що вони носять, в основному, наближений характер. Не враховується одночасно двовимірний характер розподілу тиску газу, виділення тепла в газовому шарі, нерівномірне нагрівання робочих кілець ущільнення, зміна робочого зазору за рахунок деформування робочих кілець. На підставі такого аналізу зроблено висновок про актуальність створення уточненої методики розрахунку ГТУ, що включає сумісне вирішення задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування, що і є метою даної роботи.

В другому розділі дисертації наводиться розроблена методика розрахунку ГТУ, що полягає у визначенні витратних характеристик ущільнення при деформуванні робочих кілець від дії газодинамічного тиску в зазорі, газостатичного тиску на неробочих поверхнях кілець, сили дії пружин, виділення тепла в газовому шарі, і нерівномірного нагрівання робочих кілець ущільнення. Розглядається стала робота ущільнення. Дана методика розрахунку заснована на ітераційному вирішенні взаємозалежних задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для ГТУ.

Для визначення розподілу газодинамічного тиску в зазорі між кільцями ущільнення в роботі отримано рівняння газового змащення, з урахуванням зміни температури газового шару. Записане щодо квадрата тиску рівняння газового змащення має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{\mu T_{cp}}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial x}-12\mu h\omega\sqrt{p}z\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{\mu T_{cp}}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial z}+12\mu h\omega\sqrt{p}x\right)\right]=0, \quad (1)$$

де μ - коефіцієнт динамічної в'язкості газу; $T_{ср} = T_{ср}(x,z)$ – середньоінтегральна функція зміни температури газу по товщині зазору (по координаті y); h – товщина газового шару; $p = P^2$ – квадрат тиску газу; ω - кутова швидкість обертання одного з кілець. Для отримання даного рівняння використовувалися рівняння рівноваги, рівняння стану, рівняння нерозривності, а також була введена апроксимація для коефіцієнту динамічної в'язкості газу $1/\mu = k_1 P + k_2 T + k_3$, де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти апроксимації.

Крайовими умовами до рівняння (1) є рівність тиску та температури газу їх заданим значенням на вході та виході з ущільнення:

$$P\Big|_{r=r_0} = P_0; \quad P\Big|_{r=r_2} = P_2; \quad T\Big|_{r=r_0} = T_0; \quad T\Big|_{r=r_2} = T_2, \tag{2}$$

де P_2 і P_0 – тиск газу на зовнішньому радіусі r_2 (на вході в ущільнення) та на внутрішньому радіусі r_0 (на виході з ущільнення) відповідно; T_2 і T_0 – температура газу на вході та виході з ущільнення відповідно.

До граничних умов (2) додаються умови циклічної симетрії в силу нанесеного на обертове кільце періодичного мікропрофілю.

$$P(r,\varphi) = P(r,\varphi + 2\pi/\eta_k), \tag{3}$$

де η_k – кількість мікроканавок.

В існуючих у літературі методиках розрахунку ГТУ більшість авторів обмежуються визначенням тиску, усередненого в окружному напрямку при постійній температурі і в'язкості газу. Це приводить до похибок у визначенні сумарного зусилля, що діє в зазорі, і, як наслідок, до похибок у визначенні тепловиділення в газовому шарі та до похибок при вирішенні задачі теплопровідності і деформаційної задачі, тому що деформації робочих кілець порівняні з величиною самого робочого зазору.

Для вирішення нелінійного рівняння газового змащення в частинних похідних (1) застосовується метод Бубнова-Гальоркіна в сполученні з методом скінчених елементів (МСЕ). При вирішенні газодинамічної задачі область газового шару з урахуванням умов циклічної симетрії (3) (рис.3) розбивається на 8-ми вузлові скінчені елементи (СЕ) (рис.4). Функції форм СЕ використовуються як базисні функції, що складають розв’язку рівняння у методі Бубнова-Гальоркіна. Отримана в результаті застосування методу Бубнова-Гальоркіна нелінійна система алгебраїчних рівнянь щодо невідомих значень тиску газу у вузлах скінчено-елементної моделі вирішується методом простих ітерацій. Застосування методу Бубнова-Гальоркіна в сполученні з МСЕ для вирішення рівняння газового змащення дає можливість одержувати двовимірний розподіл тиску газу в зазорі при наявності канавок будь-якої геометрії в плані.

Рис.3.Циклічно симетрична область газового шару.

Рис.4.Розбивка області газового шару на СЕ.

Для визначення температури газового шару розглядається рівняння енергії газу. З урахуванням припущень теорії газового змащення та деяких перетворень рівняння енергії газу в роботі приводиться до рівняння теплопровідності газового шару з внутрішніми тепловими джерелами.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k_T\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[k_T\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[k_T\frac{\partial T}{\partial z}\right]+\mu\left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)^2\right]-\frac{PC_v}{RT}\left(v_x\frac{\partial T}{\partial x}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=0, \quad (4)$$

де k_T – коефіцієнт теплопровідності газового шару; $T=T(x,y,z)$ – температура газу; v_x і v_z – складові швидкості газу уздовж зазору; C_v – коефіцієнт питомої теплоємності газу при постійному об'ємі; R – універсальна газова константа.

$$v_x=\frac{\partial P}{\partial x}\frac{y^2}{2}\,\bar{k}_1P+k_2T_{cp}+k_3\,\bar{}-\frac{\partial P}{\partial x}\frac{hy}{2}\,\bar{k}_1P+k_2T_{cp}+k_3\,\bar{}+\frac{y\omega z}{h}; \quad (5)$$

$$v_z=\frac{\partial P}{\partial z}\frac{y^2}{2}\,\bar{k}_1P+k_2T_{cp}+k_3\,\bar{}-\frac{\partial P}{\partial z}\frac{hy}{2}\,\bar{k}_1P+k_2T_{cp}+k_3\,\bar{}-\frac{y\omega x}{h}. \quad (6)$$

Відповідно до кінетичної теорії газів $k_T=\frac{9C_p-5C_v}{4}\mu$, C_p – коефіцієнт питомої теплоємності газу при постійному тиску.

Через великі труднощі щодо визначення коефіцієнтів тепловіддачі на робочих поверхнях кілець у зазорі в роботі розглядається спільна задача теплопровідності для газового шару і робочих кілець ущільнення. На неробочих поверхнях кілець діють умови третього роду, конвективний теплообмін з навколишнім середовищем. Коефіцієнти тепловіддачі на цих поверхнях кілець визначаються з критериальных рівнянь, що наведено в літературі. Для вирішення задачі теплопровідності застосовується МСЕ у варіаційній постановці.

На заключному етапі побудови розрахункової методики для ГТУ розглядається алгоритм вирішення задачі деформування робочих кілець від силового та температурного впливу в тривимірній постановці.

У третьому розділі дисертації наведено програмну реалізацію побудованого алгоритму вирішення задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для ГТУ. Через специфічність задачі газодинаміки в роботі створено спеціалізований програмний комплекс газодинамічного розрахунку ущільнення. Даний програмний комплекс дозволяє визначати двовимірний розподіл тиску газу в зазорі між кільцями ущільнення з урахуванням зміни температури газового шару і в'язкості газу. Також за допомогою розробленого програмного комплексу можна одержати розподіл

швидкостей газу в зазорі і витрату газу через ущільнення згідно інтегрального співвідношення для масової витрати газу $Q_r = \int_0^{2\pi} \frac{1}{12\mu RT} h^3 P \frac{\partial P}{\partial r} d\varphi$.

Вирішення задач теплопровідності та термопружності в роботі здійснюється за допомогою існуючого універсального скінчено-елементного програмного комплексу. Обмін даними між програмними комплексами відбувається автоматично за допомогою спеціально розроблених програм. На прикладі створення спеціалізованого програмного комплексу показана доцільність створення таких програм, з частковим використанням універсальних програмних комплексів та сучасних середовищ програмування.

Проведено тестування розробленого газодинамічного програмного комплексу. Результати розрахунків порівнюються з результатами, що опубліковані в літературі для ущільнень, які мають спіральні канавки. Збіг результатів досягається до 1%, що свідчить про вірність побудованого алгоритму і роботи газодинамічного програмного комплексу. Також у розділі наведено результати вирішення газодинамічної задачі для натурних конструкцій ГТУ. Розрахункові дослідження, проведені в роботі, показали, що створений газодинамічний програмний комплекс може бути використаний для уточненого розрахунку ГТУ.

Далі у даному розділі дисертації розглядаються особливості вирішення сумісної задачі теплопровідності для газового шару та робочих кілець ущільнення, і деформаційної задачі для робочих кілець. Розрахункові дослідження показали, що окружна зміна температури не впливає значно на деформований стан кілець ущільнення. Тому для вирішення задачі теплопровідності використовується осьосиметричні моделі кілець і газового шару, які розбиваються на 8-ми вузлові кільцеві СЕ (рис.5). Крім того, передбачається незмінність температури газу по товщині зазору. Газовий шар моделюється як теплові джерела, приведені до вузлів кільцевих СЕ.

Рис.5.СЕ модель задачі теплопровідності.

Під час вирішення деформаційної задачі розглядаються тривимірні моделі робочих кілець з урахуванням умов циклічної симетрії (рис.6).

а) необертове кільце. б) обертове кільце.

Рис.6.Тривимірні моделі робочих кілець.

На робочі кільця діє в зазорі нерівномірний газодинамічний тиск. На неробочих поверхнях кілець діє газостатичний тиск, рівний атмосферному та робочому тиску. Враховується також сила дії пружин, а для обертового кільця ще й дія відцентрових сил.

Для розрахунку кільця умовно закріплюють. Результати розрахунку не повинні залежати від точки закріплення. Тому зміна цієї точки може служити для контролю вихідних даних по навантаженню. Для вирішення деформаційної задачі застосовується МСЕ у варіаційній постановці. Використовується 20-ти вузловий об'ємний скінчений елемент.

Через нелінійність задач розрахунку ГТУ, а також їхню велику зв'язаність, були розроблені етапи ітераційного вирішення поставлених задач. На першому етапі в роботі розглядається ітераційне вирішення задач газодинаміки та теплопровідності. Ітераційний процес організовано методом простих ітерацій. Задавши початковий розподіл температури газового шару, вирішується газодинамічна задача. Далі підбирається величина робочого зазору з умови рівності результуючої сили газодинамічного тиску в зазорі та результуючої сили газостатичного тиску, що діє на зовнішній поверхні необертового кільця. Потім підраховуються величини потужності теплових джерел у газовому шарі для задачі теплопровідності, вирішується задача теплопровідності для газового шару і робочих кілець. Закінченням ітераційного процесу є умова

$$\left|F_{гд}^{(s)} - F_{гст}\right| \le \varepsilon_1; \quad \left|T_k^{(s)} - T_k^{(s-1)}\right| \le \varepsilon_2 \ , \qquad (7)$$

де $F_{гд}^{(s)}$ – значення результуючого газодинамічного зусилля в зазорі на s-тій ітерації; $F_{гст}$ – значення газостатичного результуючого зусилля; $T_k^{(s)}$ – значення температури на s-тій ітерації; $T_k^{(s-1)}$- значення температури на (s-1)-ої ітерації, ε_1 і ε_2 – точності визначення газодинамічної сили і температури відповідно.

На другому етапі створення ітераційного алгоритму розрахунку ГТУ розглядається ітераційне вирішення задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для обертового кільця ущільнення. Використовується також метод простих ітерацій. Він складається з двох ітераційних підциклів. Один з підциклів ітераційного процесу містить у собі ітераційне вирішення задач газодинаміки та теплопровідності, що наведено вище. Після встановлення розподілу тисків та температур газового шару здійснюється ітераційне вирішення задач газодинаміки, термопружності та силового деформування. При цьому величина робочого зазору між кільцями ущільнення перераховується з урахуванням деформацій кільця та вимоги рівноваги газодинамічної та газостатичної результуючих зусиль на кожній ітерації.

Численні розрахунки показали, що ітераційний процес вирішення сумісної задачі для необертового кільця дає погану збіжність. Були виявлені наступні фактори, що впливають на збіжність вирішення для необертового кільця ущільнення. По-перше, це велика зв'язаність задач. Особливо задачі газодинаміки та деформаційної задачі. По-друге, це умови закріплення кільця. Необертове кільце є практично незакріпленим в осьовому напрямку. По-третє,

встановлено, що на деформований стан кільця значно впливає геометрія його радіального перетину і властивості матеріалу. Необертове кільце виготовляють з низькомодульного матеріалу, що приводить до сильного порушення площинності ущільнювальної поверхні кільця в результаті його деформування.

Таким чином, виникла необхідність модифікації ітераційного процесу вирішення сумісної задачі для необертового кільця ущільнення. Модифікація заснована на тому, що вже при невеликому деформуванні кільця відбувається сильний перерозподіл газодинамічного тиску, і подальше деформування буде відбуватися за іншим законом. Тому остаточно розроблено ітераційний алгоритм сумісного вирішення задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для обох кілець, що складається з вкладених модифікованих ітераційних підциклів. У ньому на кожній глобальній ітерації по температурі, коли ітераційним шляхом вирішуються задачі газодинаміки та теплопровідності, встановлюється вид робочого зазору від деформацій обертового кільця, шляхом ітераційного вирішення задач газодинаміки, термопружності та силового деформування. Потім, з урахуванням деформацій обертового кільця, встановлюється вид робочого зазору від деформацій необертового кільця. Для цього ітераційним шляхом підбирається такий найменший розподіл переміщень на ущільнювальній поверхні необертового кільця, з урахуванням деформацій обертового кільця, при якому встановлюється рівність результуючої газодинамічної сили в зазорі і газостатичної сили на зовнішній поверхні кільця. Закінчення ітераційного процесу визначається умовою (7).

У четвертому розділі дисертації наведено результати сумісного вирішення задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для ГТУ відцентрових компресорів, що випускаються на ВАТ “Сумське НВО ім. М.В.Фрунзе”. Розрахункові дослідження проводилися згідно остаточно розробленого модифікованого ітераційного алгоритму для ущільнень двох конструкцій зі спіральними канавками. Вихідні дані наведені в таблицях 1,2.

Таблиця 1

Геометричні та робочі параметри ущільнень

№ констр.	r_0, мм	r_1, мм	R_2, мм	P_0, Атм	P_2, Атм	Глиб. канав-ки, мкм	$F_{гст}$, Н	ε_1	ε_2	ε_3
1	101	112,1	125	1,3	60,8	7	88347,98	$1\cdot10^{-1}$	$1\cdot10^{-1}$	$1\cdot10^{-5}$
2	90	101	112,5	1,3	57	7	68528,93	$1\cdot10^{-1}$	$1\cdot10^{-1}$	$1\cdot10^{-5}$

ε_3 – точність визначення тиску газу при вирішенні газодинамічної задачі.

Таблиця 2

Фізичні властивості матеріалу кілець

Вид матеріалу	E, Па	α, 1/К	$К_т$, Вт/(м·К)
Карбід вольфраму	$7 \cdot 10^{11}$	$5{,}6 \cdot 10^{-6}$	50,2
Углеграфіт	$0{,}11 \cdot 10^{11}$	$4{,}5 \cdot 10^{-6}$	23

Збіжність ітераційного процесу для першої конструкції ущільнення досягається за 4 глобальні ітерації по температурі (рис.7а) та 24 підітерації (рис.8а). Збіжність ітераційного процесу для другої конструкції ущільнення досягається за 5 глобальних ітерацій по температурі (рис.7б) та 33 підітерації (рис.8б).

а) б)

Рис.7. Графіки зміни максимальної температури газу в зазорі протягом ітераційного процесу.

а) б)

Рис.8 Графіки зміни величини зазору на виході з ущільнення протягом ітераційного процесу.

У результаті експериментальних досліджень, проведених на ВАТ “Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе”, отримані характеристики робочих параметрів розглянутих конструкцій ущільнень. На експериментальному стенді визначено тиск газу на вході та виході з ущільнення, значення температури і швидкості газу, що омиває кільця ущільнення, а також витратні характеристики ущільнень. Експериментальні дослідження показали, що при відсутності контакту поверхонь кілець ущільнень розігрів газу в зазорі відбувається в середньому до 40-50°С. У результаті розрахунків газ на виході з ущільнення розігрівається до 46°С для першої конструкції (рис.9а) і до 43°С для другої конструкції (рис.9б), що узгоджується з експериментальними даними.

а) б)

Рис.9. Остаточний розподіл температури.

Деформування кілець ущільнення в результаті дії тиску газу і температурного впливу приводить до істотного порушення площинності робочого зазору (рис.10), що у свою чергу впливає на розподіл газодинамічного тиску в зазорі (рис.11,12).

а) б)

Рис.10. Схематичне зображення остаточного виду робочого зазору

для першої (а) та другої (б) конструкцій ущільнень.

У результаті проведених розрахунків отримані величини витрати газу через ущільнення. Розрахункова величина витрати газу для першого ущільнення складає $1{,}03 \cdot 10^{-3}$ кг/сек, експериментальна величина - $1{,}12 \cdot 10^{-3}$ кг/сек. Для другої конструкції ущільнення розрахункова величина витрати газу складає $0{,}81 \cdot 10^{-3}$ кг/сек, експериментальна величина - $0{,}73 \cdot 10^{-3}$ кг/сек. Отримані результати відрізняються від експериментальних даних в першому випадку на 9% і в другому випадку на 11,5%.

Рис.11. Розподіл тиску газу при плоскому зазорі для другої конструкції ущільнення.

Рис.12. Остаточний розподіл тиску газу в зазорі для другої конструкції ущільнення.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи розроблено методику комплексного уточненого розрахунку ГТУ роторів відцентрових компресорів. Практичну цінність роботи складають розроблені математичні моделі, методики розрахунків, ітераційні алгоритми розрахунку, програмне забезпечення і проведені на їхній основі дослідження.

Найбільш важливі наукові і практичні результати роботи:

1. Проведено огляд існуючих методик розрахунку, за яким зроблено висновок, що точність опису характерних процесів в ГТУ недостатня. Не враховується одночасно двовимірний характер розподілу тиску газу в зазорі, виділення тепла в газовому шарі, нерівномірне нагрівання робочих кілець ущільнення, зміна робочого зазору за рахунок деформування робочих кілець.
2. Для визначення двовимірного розподілу газодинамічного тиску в зазорі між кільцями ущільнення вперше отримано рівняння газового змащення з урахуванням зміни температури газу в припущенні лінійної залежності величини, зворотної коефіцієнту динамічної в'язкості від температури і тиску газу.
3. Розроблено алгоритм і створено програмний комплекс, прямого чисельного вирішення отриманого рівняння газового змащення з використанням методу Бубнова-Гальоркіна в сполученні з МСЕ, та формули Гріна для зниження порядку рівняння.

4. Побудовано розрахункову модель визначення розподілу температури в робочих кільцях з урахуванням виділення тепла в газовому шарі. Для вирішення задачі теплопровідності застосовується МСЕ у варіаційній постановці.

5. Визначено деформований стан робочих кілець ущільнення від дії газодинамічного тиску в зазорі, газостатичного тиску на неробочих поверхнях кілець, сили дії пружин, нерівномірного нагрівання кілець ущільнення та виділення тепла в газовому шарі. Для вирішення деформаційної задачі застосовується МСЕ у варіаційній постановці.

6. Вперше запропоновано ітераційний підхід для вирішення комплексної задачі визначення витрати газу в ущільненні з урахуванням деформування робочих кілець від впливу газодинамічного тиску, газостатичного тиску, нерівномірного нагрівання робочих кілець та виділення тепла в газовому шарі.

7. Проведено чисельний аналіз деформованого стану і витратних характеристик натурних конструкцій ГТУ.

8. Вірогідність отриманих результатів підтверджується зіставленнями з результатами, наявними в літературі, а також з результатами натурних іспитів ГТУ на заводських стендах ВАТ “Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе” (м.Суми).

9. Результати роботи використовувалися при виконанні держбюджетних тем НТУ “ХПИ”, були впроваджені шляхом передачі теоретичних і програмних розробок, числових даних і застосовуються в практиці проектування ГТУ відцентрових машин на ВАТ “Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе”, що підтверджується актом про впровадження. Розроблену методику уточненого розрахунку можна рекомендувати при проектуванні газодинамічних ущільнень компресорів, що випускаються підприємствами України.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ломакин А.Н., Роговой Е.Д., Розова Л.В. Уточненный алгоритм газодинамического расчета “сухих” торцевых уплотнений роторов турбокомпрессоров //Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – №100.- С.134-137.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці алгоритму вирішення газодинамічної задачі, створенні програм розрахунку і проведенні чисельних досліджень для газодинамічних ущільнень.

2. Роговой Е.Д., Левашов В.А., Киселев А.М., Розова Л.В. Создание специализированного программного комплекса для расчета газодинамических торцовых уплотнений в среде Visual C++ //Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. - Харків: НТУ “ХПІ”, 2002.-Т.9,№9.-С.23-26.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці алгоритму розрахунку при створенні програмного комплексу, проведенні чисельних газодинамічних розрахунків для натурних конструкцій ущільнень.

3. Роговой Е.Д., Розова Л.В., Киселев А.М. Комплексное решение задачи проектирования газодинамических торцовых уплотнений //Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. - Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. -Т.3, №8.-С.61-66.

Здобувачем розроблено ітераційний алгоритм сумісного вирішення задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для газодинамічного торцевого ущільнення. Проведено чисельні дослідження для обертового кільця ущільнення.

4. Роговой Е.Д., Левашов В.А., Розова Л.В. К вопросу о полном расчете газодинамического торцевого уплотнения //Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання. – Харків: Ін-т проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України, 2000. -С.242-249.

Здобувачем особисто отримані вираження для швидкостей газу в зазорі між кільцями торцевих ущільнень при постійній температурі, витратних характеристик ущільнень, проведені чисельні дослідження для натурних конструкцій ущільнень роторів відцентрових компресорів.

5. Роговой Є.Д., Смірнов М.М., Розова Л.В. Методичні основи системного проектування газодинамічних торцевих ущільнень для роторних машин// Збірник наукових праць Харківської державної академії залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2003. - №55. – 53-56.

Особистий внесок здобувача полягає в огляді існуючих методик проектування і розробці уточненої методики розрахунку газодинамічних торцевих ущільнень.

6. Роговой Е.Д., Розова Л.В., Кедровская О.В. Оптимальный выбор основных геометрических параметров торцовых уплотнений с постоянными магнитами по динамическим критериям //Проблемы машиностроения. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им.А.Н.Подгорного НАН Украины, 1999. - Т.2, №.3-4. - С.37-44.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці методиці вибору оптимальних параметрів дослідних конструкцій торцевих ущільнень на постійних магнітах з умов задоволення заданим динамічним характеристикам у вигляді першого та другого параметричних резонансів.

7. Розова Л.В. Некоторые особенности уравнений газовой смазки с учетом неравномерности нагрева //Вісник інженерної академії. Спеціальний випуск.- Київ: Інженерна академія України, 2000. - С.435-438.

8. Роговой Е.Д., Левашов В.А., Розова Л.В. Особенности создания “сухих” газодинамических уплотнений с парой трения на основе “AL_2O_3-AL_2O_3”// Труды Симпозиума “Потребители производители компрессоров и компрессорного оборудования - 2002”. - СПб: СПбГТУ, 2002. -С.162-166.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці алгоритму вирішення

газодинамічної задачі, проведенні газодинамічних і деформаційних розрахунків для дослідних конструкцій торцевих ущільнень з газовим змащенням.

9. Роговой Е.Д., Левашов В.А., Розова Л.В. Двумерное распределение давления газа в “сухих” торцовых уплотнениях с учетом неравномерности нагрева //Труды 10-й международной научно-технической конференции “Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования”. - Суми: СумГУ, 2002.- Т.1. - С.65-69.

Здобувачем отримано рівняння газового змащення з урахуванням нерівномірності нагрівання і рівняння теплопровідності газового шару з внутрішніми тепловими джерелами. Побудовано ітераційний алгоритм вирішення задач газодинаміки і теплопровідності для газодинамічного торцевого ущільнення.

АНОТАЦІЇ

Розова Л.В. Сумісний аналіз газодинамічного та термопружного станів торцевих ущільнень з газовим змащенням роторів відцентрових компресорів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2003.

Дисертація присвячена створенню методики, що містить у собі розробку алгоритмів і програмного комплексу уточненого розрахунку газодинамічних торцевих ущільнень (ГТУ) роторів відцентрових компресорів, у яку входить сумісне вирішення задач газодинаміки, теплопровідності, термопружності та силового деформування для ГТУ. Вперше розроблено ітераційний алгоритм сумісного вирішення задач розрахунку ГТУ. Вперше отримано рівняння газового змащення, що враховує зміну температури газового шару і залежність в'язкості газу від температури і тиску газу, для визначення двовимірного розподілу тиску газу, у робочому зазорі. Вірогідність результатів чисельних досліджень підтверджується зіставленнями з результатами, наявними в літературі, а також з результатами натурних іспитів ГТУ на заводських стендах ВАТ “Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе” (м.Суми). Результати роботи впроваджені в практику проектування ГТУ на ВАТ “Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе”.

Ключові слова: газодинамічні торцеві ущільнення, відцентровий компресор, деформації робочих кілець, термопружність, теплопровідність, силове навантаження.

Розова Л.В. Совместный анализ газодинамического и термоупругого состояний торцовых уплотнений с газовой смазкой роторов центробежных компрессоров. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена разработке методики уточненного расчета газодинамических торцовых уплотнений (ГТУ) роторов центробежных компрессоров, которая включает в себя решение взаимосвязанных задач газодинамики, теплопроводности, термоупругости и силового деформирования. Исследуемыми объектами являются ГТУ. Для получения расходных характеристик ГТУ в работе определяется деформированного состояние рабочих колец уплотнения с учетом условий реального нагружения. На рабочие кольца ГТУ действует в зазоре между кольцами величиной 3-5 мкм неравномерное газодинамическое давление, на нерабочих поверхностях колец – газостатическое давление, равное максимальному давлению в компрессоре и атмосферному на выходе из уплотнения. Учитывается также сила действия пружин. На рабочие кольца также оказывают влияние температурные нагрузки, зависящие от неравномерного нагрева колец и выделения тепла в газовом слое. Основную сложность в определении нагрузок, действующих на кольца уплотнения, составляет газодинамическое давление в зазоре. Для определения распределения газодинамического давления в работе впервые получено уравнение газовой смазки с учетом изменения температуры газового слоя и зависимости коэффициента динамической вязкости газа от температуры и давления газа. Решение уравнения газовой смазки осуществляется методом Бубнова-Галеркина в сочетании с методом конечных элементов. Для определения температуры газового слоя рассматривается уравнение энергии газа, которое с учетом предположений теории газовой смазки и некоторых преобразований приводится в работе к уравнению теплопроводности газа с внутренними тепловыми источниками. В силу затруднительности постановки граничных условий для задачи теплопроводности газа на поверхностях, граничащих с поверхностями рабочих колец уплотнения, решается совместная задача теплопроводности для газового слоя и рабочих колец уплотнения. Решение задачи теплопроводности осуществляется методом конечных элементов в вариационной постановке. На окончательном этапе создания уточненной методики расчета ГТУ рассматривается алгоритм решения задачи деформирования рабочих колец уплотнения от действия газодинамического давления, газостатического давления, силы действия пружин, неравномерного нагрева рабочих колец и выделения тепла в газовом слое. Деформационная задача решается в трехмерной постановке также с использованием методом конечных элементов.

В работе впервые разработан итерационный алгоритм совместного решения задач газодинамики, теплопроводности, термоупругости и силового

деформирования для ГТУ, состоящий из вложенных модифицированных итерационных подциклов. Для решения задачи газодинамики создан специализированный газодинамический программный комплекс. Проведено тестирование созданного программного комплекса и разработанного алгоритма решения. Результаты расчетов сравниваются с результатами, имеющимися в литературе. Для решения задач теплопроводности и термоупругости применяется существующий универсальный конечно-элементный программный комплекс. Связь между программными комплексами осуществляется автоматически с помощью специально разработанных программ.

Проведены численные исследования натурных конструкций ГТУ центробежных компрессоров, выпускаемых на ОАО “Сумское НПО им.М.В.Фрунзе” (г.Сумы). В результате расчетов определено распределение газодинамического давления в зазоре, температуры в газовом слое и рабочих кольцах, деформации рабочих колец уплотнений, вид рабочего зазора с учетом деформаций колец, расходные характеристики уплотнений. Полученные результаты совпадают с результатами экспериментальных исследований, проводимых на ОАО “Сумское НПО им.М.В.Фрунзе”.

Результаты диссертационной работы в виде методик расчета и программного обеспечения внедрены и используются для анализа перспективных проектов ГТУ на ОАО “Сумское НПО им.М.В.Фрунзе”.

Ключевые слова: газодинамические торцовые уплотнения, центробежный компрессор, деформации рабочих колец, термоупругость, теплопроводность, силовое нагружение.

Rozova L.V. The simultaneous analysis of gas-dynamic and thermoelastic states of the gas seals for the rotors of centrifugal compressor. – Manuscript.

Thesis for candidate of technical sciences degree by the speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. – National technical university “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2003.

The thesis is dedicated to the creation of analysis’ algorithm and solution programs for the dry gas seals of the rotors of centrifugal compressor. This analysis’ algorithm consists of simultaneous solution of the interrelated heat transfer, thermoelasticity, power warping and gas dynamics tasks for the gas seals. The iteration algorithm of simultaneous solution of this tasks has been developed for the first time. The gas lubrication equation considering heat evolution in the gas layer and changes of gas viscosity has been derived for the first time. This equation defines two-dimensional pressure distribution in the gas layer. The verification of numerical calculations has been justified by comparison with the results of other authors’ works and with the results of experimental investigations of the gas seals. The results of this work have

been applied in industry for the designing of the gas seals on Sumy scientific-manufacturing enterprise.

Key words: gas seals, centrifugal compressor, the deformations of seal rings, thermoelasticity, heat transfer, power loading.

Автореферат

СУМІСНИЙ АНАЛІЗ ГАЗОДИНМІЧНОГО ТА ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНІВ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ З ГАЗОВИМ ЗМАЩЕННЯМ РОТОРІВ ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРІВ

Розова Людмила Вікторівна

Відповідальний за випуск: к.т.н. О.І. Трубаєв