

На правах рукопису

Чернов Олександр Євгенович

**РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНИХ  
ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ ДЛЯ ШВИДКОХІДНИХ  
ТУРБОНАСОСНИХ АГРЕГАТІВ**

Спеціальність: 05.04.13 - гідравлічні машини та  
гідропневмоагрегати

Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук





Дисертацією є рукопис.  
Робота виконана на кафедрі загальної механіки  
Сумського державного університету.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор  
Марцинковський Володимир Альбінович.

Науковий консультант - кандидат технічних наук, доцент  
Хворост Володимир Андрійович.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
Кревсун Едуард Павлович,  
кандидат технічних наук  
Черепов Леонід Володимирович.

Провідне підприємство - науково-виробниче об'єднання "Енергомаш"  
ім. акад. В.П. Глушка, м.Химки Московської обл.

Захист відбудеться 21 вересня 1995 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 22.01.02 в Сумському державному університеті (244007, Суми, СумДУ, вул. Римського-Корсакова, 2).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету.

Автореферат розісланий 15 серпня 1995 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Неня В.Г.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## 1. Загальна характеристика роботи

Досягнутий за останній час успіх в освоєнні космічного простору нерозривно пов'язаний із створенням надійних рідинних ракетних двигунів (РРД) великої потужності. Одним із основних агрегатів таких двигунів є турбонасосний агрегат (ТНА), що забезпечує подачу компонентів палива до камери згоряння. Ефективність та надійність ТНА багато в чому залежить від робочих характеристик ущільнень, які обмежують витікання робочого середовища по валу між насосами пального та окислювача, а також порожниною газової турбіни. Для ущільнень ТНА РРД характерні виключно важкі умови роботи: високі окружні швидкості, великі перепади тиску, середовища, що ущільнюються, хімічно активні, вибухонебезпечні рідини, які містять тверді малорозмірні включення. Поряд з цим від ущільнень вимагається абсолютно надійна робота на протязі всього робочого циклу двигуна, при цьому ресурс РРД багаторазового використання може складати години на протязі 20 та більше пускових циклів.

Забезпечення своєчасного технічного рівня РРД потребує постійного підвищення економічності ущільнень ТНА при збереженні досягнутого рівня надійності. Одним з найбільш перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування в ТНА нових типів торцевих ущільнень з саморегульованим зазором (ТУСЗ), зокрема імпульсних торцевих ущільнень (ІТУ). Експлуатаційні характеристики ТУСЗ перед усім визначаються геометрією кілець торцевої пари, окрім того великий вплив на працездатність торцевих ущільнень виявляють силові та температурні деформації ущільнювальних кілець, що викликані великими тисками та перепадами температур. Враховуючи підвищені вимоги до надійності, що ставляться до ущільнень РРД, стає очевидною необхідність старанного вибору геометрії кілець торцевої пари з метою досягнення оптимального сполучення показників надійності та економічності при заданих умовах роботи.

## 2. Актуальність і ступінь дослідженості тематики дисертації

Актуальність дисертаційної роботи полягає в:

- розробці надійних та економічних імпульсних торцевих ущільнень для турбонасосних агрегатів РРД, що за експлуатаційними якостями не поступаються закордонним аналогам;
- розробці методики розрахунку та, на її основі, методики мінімізації деформацій кілець ІТУ з металевими вторинними ущільненнями;
- розв'язанні задачі оптимізації імпульсних торцевих ущільнень і створенні на її основі системи автоматизованого проектування ІТУ

на надвисокі робочі параметри.

Ступінь дослідженості тематики роботи:

- виконані широкомасштабні експериментальні дослідження ІТУ з пружною металевою манжетою як вторинне ущільнення. З'ясовано характер та особливості впливу конструкції вторинного ущільнення на працездатність торцевої пари;

- виконані дослідження впливу розмірів та форми ущільнювальних кілець на деформації останніх;

- виконані експериментальні дослідження ІТУ в криогенному робочому середовищі (рідинний азот) в умовах, що імітують роботу ущільнення в складі ТНА РРД багаторазового використання.

### **3. Мета роботи та основні завдання наукового дослідження**

Мета роботи полягає в підвищенні економічності турбонасосних агрегатів РРД за рахунок створення нової конструкції ущільнення вала, що задовольняє підвищені вимоги з надійності та герметичності, що ставляться до ущільнень сучасних ракетних двигунів.

Основними завданнями наукового дослідження є:

- дослідження ІТУ з металевим вторинним ущільненням;

- розробка інженерної методики розрахунку та мінімізації деформацій ущільнювальних кілець з металевим вторинним ущільненням;

- розв'язання задачі оптимізації імпульсних торцевих ущільнень та створення на її основі системи автоматизованого проектування ІТУ надвисокі робочі параметри;

- експериментальні дослідження ІТУ при надвисоких робочих параметрах ( $p_v = 400$  Мпа м/с) у криогенному робочому середовищі.

### **4. Обґрунтування теоретичної та практичної цінності досліджень**

Теоретична цінність роботи полягає в розв'язанні задачі оптимізації імпульсних торцевих ущільнень та створенні методики розрахунку і мінімізації деформацій ущільнюючих кілець з пружною металевою манжетою.

Практична цінність роботи:

- створена та експериментально відпрацьована конструкція надійного та економічного імпульсного торцевого ущільнення з пружною металевою манжетою, досліджено вплив на працездатність та економічні характеристики ущільнювального вузла конструкції вторинного ущільнення;

- розроблено інженерну методику розрахунку та мінімізації деформацій ущільнювальних кілець з пружною металевою манжетою, що дозволяє звести деформації кілець до величин, котрими можна

нехтувати, забезпечуючи тим самим високий рівень площинності ущільнювальних поверхонь;

- розв'язана задача оптимізації імпульсних торцевих ущільнень, котра дозволяє визначати параметри ущільнювальних кілець, що забезпечують найкращі для даних умов роботи експлуатаційні характеристики ущільнення;

- створена система автоматизованого оптимального проектування імпульсних торцевих ущільнень на надвисокі робочі параметри, котра дозволяє значно скоротити витрати часу та коштів на розробку ущільнення;

- на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень вироблені рекомендації з проектування імпульсних торцевих ущільнень на надвисокі параметри.

### **5. Наукова новизна роботи**

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- вперше вирішена задача оптимізації імпульсних торцевих ущільнень та мінімізації силових та температурних деформацій їх кілець;

- вперше виконані широкомасштабні експериментальні дослідження конструкцій ІТУ з пружною металевою манжетою як вторинне ущільнення, з'ясовано характер та особливості впливу конструкції вторинного ущільнення на працездатність торцевої пари;

- вперше виконано експериментальні дослідження ІТУ в криогенних робочих середовищах при надвисоких робочих параметрах;

- створено систему автоматизованого проектування імпульсних торцевих ущільнень, що дозволяє виконувати оптимальне проектування кілець ІТУ.

### **6. Рівень реалізації та впровадження наукових розробок**

Розроблене з використанням оптимізаційних методик імпульсне торцеве ущільнення з металевою манжетою з успіхом пройшло промислові випробування і рекомендовано до використання в турбонасосах ракетних двигунів.

Програмний комплекс для автоматизованого проектування імпульсних торцевих ущільнень на надвисокі робочі параметри та його окремі модулі впроваджені на НВО "Енергомаш" ім. акад. В.П. Глушка.

Розроблені на основі проведених досліджень рекомендації з проектування ущільнювальних систем роторів швидкохідних машин використовуються на НВО "Енергомаш" ім. акад. В.П. Глушка.

### **7. Апробація та публікація результатів роботи**

Основні результати дисертаційної роботи докладались:

- на V Всесоюзній науково-технічній нараді з ущільнювальної техніки, м. Суми, 1988 р.;
- на VI науково-технічній конференції "Уплотнения и вибрационная надежность центробежных машин", м. Суми, 1991 р.;
- на VII науково-технічній конференції "Герметичность и вибро-надежность насосов и компрессоров", м. Суми, 1993 р.;
- на науково-технічній конференції викладачів, співробітників та студентів СумДУ, 1994 р.;
- на міжнародній науково-методичній конференції "Автоматизация конструирования изделий и проектирования технологических процессов в машиностроении", м. Суми, 1994 р.;
- на науково-технічній конференції викладачів, співробітників та студентів СумДУ, 1995 р.;
- на II Міжнародному Конгресі українських інженерів-механіків у Львові, 1995 р.;
- на VII науково-технічній конференції 'Uzczelnienia i technika uszczelnienia w maszynach i urzadzeniach', Szklarska Poreba, Польща, 1995 р.;
- на науковій сесії, присвяченій 30-й річниці Політехніки Свен-токшицкей, Кельце, Польща, 1995 р.

З даної теми дисертаційної роботи опубліковано 7 тезисів докладів, 7 докладів на науково-технічних конференціях, в тому числі 4 - на міжнародних, одержано 7 авторських свідоцтв СРСР на винаходи.

### **8. Обсяг та структура роботи**

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти глав, заключення, списку використаних першоджерел, який містить 108 найменувань та прикладень. Містить 143 сторінки машинописного тексту, 60 рисунків, 21 таблицю.

### **9. Декларація особистого внеску дисертанта у розробку наукових результатів, що виносяться на захист**

Дисертант самостійно розв'язав задачу оптимізації геометричних параметрів кілець ІТУ, модифікував метод пошуку екстремуму функції багатьох змінних, виконав числові дослідження по визначенню ефективності модифікованого методу оптимізації. Розробив методику та комп'ютерну програму для розрахунку деформацій кілець торцевих ущільнень, інженерну методику мінімізації деформацій кілець ІТУ, алгоритм та програмне забезпечення САПР ІТУ на надвисокі робочі параметри. Брав участь у виготовленні експеримен-

тальних вузлів ущільнень та розробці методики експериментальних досліджень ІТУ з пружною металевою манжетою, виконанні експериментальних досліджень ІТУ на воді та повітрі.

Виконав розрахунки та оптимізацію геометричних параметрів кілець ІТУ для експериментальних досліджень в кріогенному робочому середовищі, брав участь в розробці методики досліджень, аналізі одержаних даних.

### **10. Характеристика методології дослідження об'єкта**

Експериментальні дослідження ІТУ були виконані на спеціально розроблених стендах в лабораторії герметичності та вібронадійності роторних машин СумДУ та дослідницькій лабораторії НВО "Енергомаш" ім. акад. В.П. Глушка.

Теоретичною базою для вибору напрямку досліджень стали методи розрахунку статичних та динамічних характеристик торцевих ущільнень з саморегульованим зазором, що розроблені в наукових роботах д-ра техн. наук, проф. В.А. Марцинковського. Розрахунки та мінімізація деформацій кілець ІТУ з пружною металевою манжетою виконувалися на базі теорії вісесиметричних деформацій Біцено та моментної теорії коротких циліндричних оболонок. Для пошуку екстремумів цільових функцій при вирішенні задачі оптимізації ІТУ використовувався модифікований автором відомий метод Нелдера-Міда.

### **11. Зміст роботи**

В с т у п. Обґрунтовується актуальність, наукове та практичне значення теми дисертаційної роботи.

У першій главі розглянуто сучасний стан проблеми герметизації роторів ТНА; проведено аналіз умов експлуатації ущільнень у складі РРД та основних вимог до них. Виконано огляд сучасних конструкцій торцевих ущільнень швидкохідних високонапірних машин, проаналізовано переваги та недоліки різних типів ТУСЗ, розглянуто різні варіанти конструкцій вторинних ущільнень, придатних для експлуатації в агресивних кріогенних середовищах.

Як об'єкт для подальших досліджень обрано торцеве ущільнення з імпульсним розвантаженням пари тертя і з вторинним ущільненням у вигляді пружної металевої манжети.

В другій главі наведені результати експериментальних досліджень ІТУ, під час яких проводилось відпрацювання конструкції ущільнення з металевим вторинним герметизатором (манжетою), призначеним для роботи в умовах великих швидкостей та великих тисків, що характерні для ТНА РРД. Дослідження виконувалися

лись на експериментальному стенді, створеному у лабораторії герметичності та вібронадійності роторних машин Сумського державного університету. Робоче середовище - вода, повітря ( $t=15^{\circ}-25^{\circ}\text{C}$ ).

На початковому етапі досліджувалось металеве вторинне ущільнення з метою перевірки його працездатності, оцінки сили тертя та герметичності по манжеті в залежності від величини попереднього натягу. На основі одержаних результатів для даної конструкції ущільнення прийнято натяг величиною 0,03-0,05 мм на діаметр 159-161 мм. Сила тертя зрушення у вторинному ущільненні при цьому  $F_{тр} = 340\text{ Н}$ , зусилля попереднього підтискання пружини обрано -  $F_{пр} = 500\text{ Н}$ .

На наступному етапі досліджувались 8 конструктивних варіантів ІТУ, що відрізнялися конструкцією вторинного ущільнення та розмірами поперечних перерізів аксіально рухомих кілець (рис. 1). Дослідження проводились на стоянці, ущільнюваний тиск змінювався у діапазоні  $p=0,0-7,0\text{ МПа}$  з кроком 1,0 МПа. Метою експериментів було вивчення впливу великих перепадів тиску на ІТУ з металевою манжетою, перевірка міцності та герметичності пружних вторинних ущільнень при багаторазовому силовому навантаженні. Під час досліджень виявилось, що наявність тонкого оболонкового елемента (металевої манжети) в конструкції ущільнення визначає підвищену чутливість останнього до величини ущільнюваного тиску. Виникаючі при цьому деформації ущільнювальних кілець, виконаних як єдине з манжетою, призводили до розгерметизації ущільнення по торцевому контакту. Величина деформацій визначається формою та розмірами поперечного перерізу кільця, випадків руйнування чи розгерметизації вторинного ущільнення через наявність залишкових деформацій не спостерігалось.

У ході третього етапу 8 конструктивних варіантів ІТУ досліджувались при обертанні ротора в діапазоні режимних параметрів  $p=1,0-7,0\text{ МПа}$ ,  $n=1000-12000\text{ об/хв}$ . Характерною особливістю цієї частини експериментів було ступінчасте зміння режимних параметрів. Спочатку ІТУ досліджувались при постійній швидкості обертання ротора  $n=12000\text{ об/хв}$  і перепаді тиску, який змінювався з кроком 1,0 МПа. Потім тиск утримувався постійним  $p=7,0\text{ МПа}$ , а швидкість обертання змінювалась з кроком 1000 об/хв. При виконанні експериментів аналізувались функціональні можливості різних конструктивних варіантів ущільнень, вплив режимних параметрів на їх працездатність. Особлива увага приділялась стійкості безконтактної роботи ущільнювальних поясків, про що свідчили допустима величина протікання та відсутність слідів зносу робочих поверхонь.

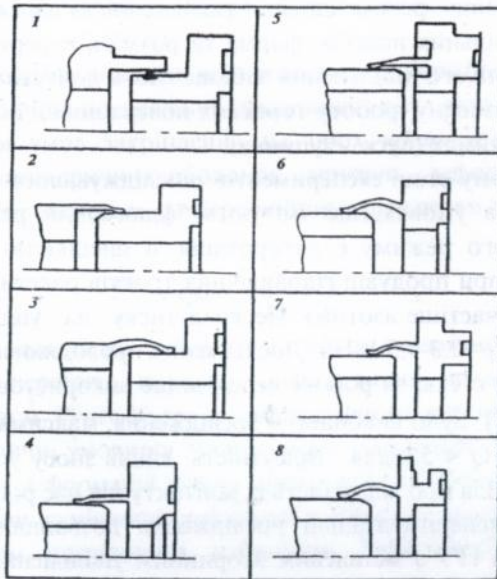


Рис. 1 Конструктивні варіанти ущільнень

Дослідження ІТУ при ступінчастій зміні режимних параметрів показали, що разом із ростом ущільнюваного тиску більшість ущільнень, кільця яких виконані як єдине з манжетою, втрачали працездатність внаслідок порушення безконтактного режиму роботи. При візуальному огляді їх торцевих поверхонь спостерігались сліди зносу у вигляді полос шириною від 2 до 8 мм та глибиною від 0,3-0,5 мм, рівномірно розподілених по колу. Також були помітні сліди перенесення матеріалу опорного гребеня на аксіально рухоме кільце. З ростом частоти обертання ротора в усіх варіантах ущільнень відмічалась явна тенденція до зменшення витоків на 15 - 20%. На основі результатів досліджень відібрано 4 перспективні для використання у ТНА конструктивні варіанти ущільнень.

У ході наступного етапу досліджень перевірялась придатність ІТУ з металевою манжетою для роботи в складі ТНА РРД багаторазового використання. З цією метою відібрані варіанти ущільнень досліджувались в серії з 5-10 робочих циклів без проміжного розбирання. Методика проведення одного робочого циклу - пуск ( $p=0,4$  МПа), робота на номінальному режимі ( $p=7,0$  МПа,  $n=12000$  об/хв) на протязі 10 хв., зупинка ( $p=0,4$  МПа) та перевірка герметичності на стоянці ( $p=1,0$

МПа). За результатами досліджень до використання у ТНА багаторазового використання рекомендовано ущільнення за варіантом 5. Геометрія ущільнювальних поясків, форма та розміри перерізу аксіально рухомого кільця цього ущільнення забезпечують допустиму величину протікання і беззносну роботу торцевих поверхонь на номінальному та перехідних режимах (пуск - зупинка).

На заключному етапі експериментів досліджувалось ущільнення за варіантом 5 в умовах, що імітують "флюгерний режим" ТНА. Особливістю цього режиму є авторотація зі швидкістю  $n=600-1800$  об/хв валу ТНА при продувці гідравлічних трактів ракетного двигуна інертним газом (частіше азотом). Перепад тиску на ущільненні при цьому становить  $p=0,3-0,5$  МПа. Дослідження проводились при  $p=0,4$  МПа,  $n=500-5000$  об/хв, за робоче середовище використовувалось повітря ( $t=15^{\circ}-25^{\circ}$  С). Було виконано 4 дослідження, максимальні витоки не перевищували  $Q < 5$  нл/хв. Відсутність слідів зносу ущільнювальних поясків свідчила про відсутність їх контакту під час роботи.

Проведені експериментальні дослідження дозволили відпрацювати конструкцію ІТУ з металевим вторинним ущільненням, виявити характер впливу режимних параметрів та конструкції манжети на працездатність торцевої пари, визначити напрям подальших теоретичних досліджень.

В главі 3 розроблено метод розрахунку та мінімізації деформації кілець імпульсних торцевих ущільнень. Згідно з теорією Біцено деформація кільцевих деталей під впливом силового та теплового навантажень являє собою оберт поперечного перерізу відносно осі, що проходить через його центр ваги

$$\varphi = \frac{M_p + M_t}{EJ_y} R_0. \quad (1)$$

Момент  $M_p$  від віссиметричного силового навантаження визначається підсумуванням моментів від навантажень, які діють на окремі ділянки циліндричної та торцевої поверхні кільця. Момент від навантаження, яке діє на торцеву ділянку поверхні кільця визначається інтегруванням тиску за радіусом. Для циліндричної ділянки поверхні момент обчислюється інтегруванням за кутом між лінією дії навантаження та віссю, яка є перпендикуляром до осі кільця. Для обчислення моменту  $M_t$ , зумовленого нерівномірним розігрівом кільця, виконується розрахунок теплового стану торцевої пари. Для визначення геометричних характеристик поперечного перерізу кільця довільної форми контур перерізу апроксимується замкнутою ломаною. Після чого обчислюються та сумуються геометричні характеристики

трикутників, котрі утворені між точкою початку системи координат  $O$  та двома сусідніми точками контура перерізу з координатами  $(x_i, y_i)$  та  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ .

Пружна металева манжета розглядається як коротка циліндрична оболонка зі змінною по довжині товщиною, для якої враховується взаємний вплив умов закріплення на обох краях. Згідно з моментною теорією циліндричних оболонок пружно деформований стан (ПДС) манжети описується диференціальним рівнянням четвертого порядку

$$\frac{d^4 \omega}{dx^4} + 4\beta \omega = -\frac{\mu T_x}{Dr} + \frac{P_1}{D} \quad (2)$$

Це рівняння зводиться до системи з чотирьох звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, інтегрування якої виконується чисельно методом Рунге-Кутта з автоматичним вибором кроку інтегрування. Граничні умови на лівому кінці задаються з урахуванням умов сумісності деформацій кільця ущільнення та оболонки в точці їх з'єднання. Умови сумісності деформацій кільця та манжети задовольняються шляхом послідовних наближень. Деформації ущільнювального кільця з манжетою, яка виконана на статорній втулці, визначаються аналогічним чином, при цьому вважається, що на правому кінці манжета нерухомо затиснута. У даній главі подаються розрахункові дані, що показують вплив конструкції вторинного ущільнення та розмірів ущільнювального кільця на величину деформації останнього. Порівняння розрахункових та експериментальних даних показало їх добрий якісний та кількісний збіг.

Мінімізація деформацій кілець ІТУ здійснювалась шляхом підбору таких геометричних параметрів перерізу, при яких величина підсумкового моменту від силового та теплового навантаження стає такою, якою можна нехтувати. В главі розглянуто практичний приклад мінімізації деформацій ущільнювального кільця з металевою манжетою. Порівняння результатів розрахунку, одержаних методом граничних елементів та розробленим автором методом, показало, що похибка становить не більш 0,1 мкм.

В главі 4 розроблено метод оптимізації геометрії ущільнювальних кілець, виконано модифікацію алгоритму мінімізації функцій декількох змінних Нелдера-Міда з метою підвищення його ефективності, дано опис системи автоматизованого оптимального проектування ІТУ.

Задача оптимізації ІТУ формулюється таким чином: серед множини геометричних параметрів  $X$ , які чинять вплив на експлуатаційні

характеристики ущільнення  $Y$ , знайти такі  $X^*$  та  $Y^*$ , при яких функція  $F_k$ , котра є інтегральним показником якості, приймає екстремальне значення. Значення  $F_k$  залежить також від множини зовнішніх факторів  $W$ , які характеризують умови експлуатації. На геометричні параметри  $X$  і характеристики ущільнення  $Y$  накладаються обмеження у вигляді нерівностей, які враховують конструктивні та технологічні вимоги

$$F_k(X^*, Y^*, W) = \min F_k(X, Y, W),$$

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max},$$

$$Y_1(X, W) \leq Y \leq Y_2(X, W).$$
(3)

Під час вирішення цієї задачі використано принцип декомпозиції, який дозволяє спростити процес оптимізації шляхом розбиття його на етапи, що мають менше число оптимізуємих параметрів.

На першому етапі визначаються геометричні параметри ущільнювальних кілець, які забезпечують:

- оптимальну з точки зору надійності і економічності величину торцевого зазору на робочому режимі;
- максимальне значення коефіцієнта статичної жорсткості;
- безконтактний режим роботи ущільнювальних поверхонь в робочому діапазоні тисків і швидкостей обертання ротору;
- необхідний запас статичної та динамічної стійкості.

Цільова функція сформована таким чином, щоб у точці мінімуму її значення дорівнювало 0. Вимоги забезпечення статичної та динамічної стійкості, потрібного діапазону надійності функціонування враховуються у вигляді штрафних функцій  $F_i(X)$  з ваговими коефіцієнтами  $\omega_i$ , які визначають суворість виконання вказаних обмежень

$$F_{k1}(X) = |U - 1| + |G - 1| + \sum_{i=1}^{n-3} \omega_i F_i(X).$$
(4)

Як параметри оптимізації використовуються розміри торцевих поясків та камер, коефіцієнт навантаження. Параметричні обмеження задаються на основі досвіду проектування імпульсних ущільнень.

На другому етапі оптимізації забезпечується площинність ущільнювальних поясків шляхом мінімізації деформацій кілець торцевої пари. Цільова функція має вигляд

$$F_{k2}(X) = |\delta| + \omega_1 F_1(X),$$
(5)

де  $F_1(X)$  - штрафна функція для виконання обмежень на довжину кільця. Як параметри оптимізації  $X$  в цьому випадку використовуються осові розміри окремих частин поперечного перерізу кільця.

Параметричні обмеження, що враховують допустимі для даної конструкції осьові та радіальні габарити кільця, задаються при проектуванні.

Пошук екстремуму цільових функцій  $F_{k1}(X)$ ,  $F_{k2}(X)$  здійснюється чисельно за допомогою методу Нелдера-Міда, який був модифікований автором з метою підвищення його ефективності. Суть нововведень зводиться до того, що замість регулярного симплексу використовується невпорядкований комплекс точок, що одержані випадковим способом. Це дозволяє підвищити вірогідність відшукування глобального екстремуму функції, підвищити ефективність та стійкість методу. В роботі наведені результати тестування модифікованого алгоритму Нелдера-Міда, які свідчать про підвищену точність та швидкість методу.

В главі також дано опис системи автоматичного проектування (САПР) імпульсних торцевих ущільнень, в основу якої покладені оптимізаційні методики. Система має зручний графічний інтерфейс користувача, дозволяє виконувати проектування ущільнень в автоматизованому та діалоговому режимі. На рис. 2 показано результати оптимізації ІТУ, що була виконана за допомогою САПР. Наведені характеристики свідчать про помітне поліпшення експлуатаційних якостей ущільнення.

В главі 5 наведені результати експериментальних досліджень ІТУ з металевою манжетою в рідкому азоті при температурі  $t=-195^{\circ}\text{C}$ . Геометрія кілець ІТУ була одержана в результаті використання оптимізаційних методик. Дослідження виконувались на розробленому в НВО "Енергомаш" ім. акад. В.П. Глушка експериментальному стенді. Конструкція стенду дозволяє досліджувати торцеві ущільнення в криогенних робочих середовищах (рідкі азот, кисень) при великих швидкостях і тисках ( $n=16000, 24000$  об/хв,  $p=4,0$  МПа).

Програма досліджень включала:

- контроль герметичності ущільнення перед пуском та після (повітря,  $n=0$  об/хв,  $p=0,3$  МПа,  $t=10^{\circ}-25^{\circ}\text{C}$ );
- перевірку працездатності ІТУ при надвисоких робочих параметрах та низьких температурах (рідкий азот,  $t=-195^{\circ}\text{C}$ ,  $n=24000$  об/хв,  $p=4,0$  МПа);
- перевірку працездатності ущільнення на змінних режимах експлуатації, в ході виконання 3 циклів без проміжного розбирання вузла (пуск, вихід на номінальний режим, рідкий азот,  $t=-195^{\circ}\text{C}$ ,  $n=24000$  об/хв,  $p=4,0$  МПа);
- огляд стану торцевих поверхонь після завершення експерименту.



Рис. 2 Результати оптимізації імпульсного ущільнення

Під час досліджень було проведено 14 випробувальних пусків, з них 3 - серіями по 3 пуски-зупинки без проміжного розбирання ущільнення. Вся програма експериментів була виконана на одному комплекті ІТУ. Загальний час роботи ущільнювального вузла становив 608,2 с. Середня величина витікання азоту на номінальному режимі ( $p=4,0$  МПа,  $n=24000$  об/хв) не перевищувала  $Q < 40$  мл/с. Температура в області тертя була стабільною і відрізнялася від температури ущільнювальної порожнини не більш ніж на  $1^\circ - 2^\circ$  С. Витікання повітря на стоянці не перевищували допустиму величину.

Результати промислових випробувань ІТУ, спроектованого на основі оптимізаційних методик, показали, що створена конструкція ІТУ з металевою манжетою повністю задовольняє підвищеним вимогам, що ставляться до ущільнень ТНА криогенних РРД. Заходи по оптимізації геометрії кілець ІТУ на стадії проектування дозволили значно скоротити обсяг дорогих експериментів у криогенному робочому середовищі. Використана при розрахунках математична модель ІТУ, що розроблена для висококиплячих рідин, може бути

пульсна конструкція торцевої пари забезпечує беззносну роботу ущільнювальних поверхонь в легкокиплячих робочих середовищах в умовах низьких температур ( $t=-195^{\circ}\text{C}$ ) та надвисоких робочих параметрів ( $p=400$  МПа м/с). Конструкція металевого вторинного ущільнення забезпечувала потрібну герметичність та рухомість нерухомого кільця в умовах низьких температур та високих тисків.

За оцінками спеціалістів НВО "Енергомаш" ім. акад. В.П. Глушка заміна існуючих ущільнень ТНА на ущільнення імпульсного типу дозволить підвищити ККД турбонасосного агрегату на 2-3%, при цьому приріст потужності ТНА ракетного двигуна великої потужності становить приблизно 3 000..4 000 КВт.

## 12. Основні результати роботи та підсумки

Основними результатами одержаними в дисертаційній роботі є:

1. Огляд літературних джерел та порівняльний аналіз ущільнень швидкохідних машин показав, що потрібний рівень надійності та герметичності при надвисоких робочих параметрах, що характерні для ТНА РРД, можна забезпечити за рахунок використання імпульсних торцевих ущільнень. На основі досвіду успішного застосування пружних металевих манжет в хімічно активних середовищах при тяжких робочих умовах ( $t=-200^{\circ}\text{C}..+200^{\circ}\text{C}$ ,  $p=12,0$  МПа) зроблено висновок про доцільність застосування металевих манжет, як вторинних ущільнень.

2. На розробленому у лабораторії герметичності та вібронадійності роторних машин СумДУ експериментальному стенді проведені всебічні дослідження імпульсних торцевих ущільнень з різноманітними конструкціями металевого вторинного ущільнення. Одержані результати дозволили виявити характер впливу режимних параметрів та конструктивних особливостей кілець торцевої пари на працездатність ущільнення, зв'язок між величиною деформації кілець та конструкцією вторинного ущільнення, розмірами поперечного перерізу кільця торцевої пари.

3. На підставі теорії вісесиметричних деформацій кільцевих деталей та моментної теорії циліндричних оболонок розроблено методику розрахунку деформацій ущільнювальних кілець з металевою манжетою. Ця методика дозволяє отримувати добре співпадання результатів розрахунку та експеримента, при цьому надає можливість наглядно продемонструвати залежність величини деформації від геометричних параметрів кілець та умов роботи. Створена на її основі методика мінімізації деформацій ущільнюючих кілець дозволяє звести їх до величини, котрою можна нехтувати, тим самим досягається

високий ступінь площинності торцевих поверхонь.

4. Розв'язана задача оптимізації імпульсних торцевих ущільнень. На її базі створено систему автоматизованого проектування, котра дозволяє в автоматичному режимі визначити геометричні параметри ущільнювальних кілець, котрі забезпечують оптимальне поєднання показників надійності та герметичності для заданих робочих умов, а також мінімально можливі силові та температурні деформації останніх. Діалоговий режим системи дозволяє моделювати роботу імпульсного ущільнення в різноманітних умовах і середовищах, оцінювати вплив окремих геометричних та конструктивних параметрів на експлуатаційні характеристики.

5. На рідкому азоті ( $t=-195^{\circ}\text{C}$ ) при надвисоких робочих параметрах ( $p_v=400\text{ МПа м/с}$ ) виконано експериментальні дослідження імпульсного торцевого ущільнення, зпроектованого на основі оптимізаційних методик. Результати експериментів у криогенному середовищі свідчать про високі експлуатаційні якості ущільнень імпульсного типу та ефективність заходів по оптимізації геометрії ущільнювальних кілець. По попереднім оцінкам застосування імпульсних торцевих ущільнень в ТНА РРД дозволяє підвищити ККД турбо-насосного агрегату на 2-3 %.

6. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблені рекомендації з проектування імпульсних торцевих ущільнень для роторів ТНА, що дозволяють обґрунтовано вибирати конструктивні параметри узлів, скоротити строки створення нових виробів.

7. Результати теоретичних та експериментальних досліджень імпульсних ущільнень впроваджені на НВО "Енергомаш" ім. акад. В.П. Глушка та в лабораторії герметичності та вібронадійності роторних машин Сумського державного університету.

### 13. Список опублікованих наукових праць

1. Лапоног С.Т., Чернов А.Е., Марцинковский В.А., Громько Б.М. Исследование импульсных торцевых уплотнений на высокие параметры. /Груды VI научно-технической конференции "Уплотнения и вибрационная надежность центробежных машин": - Сумы, 1991 г., стр. 44-49.

2. Чернов А.Е., Лапоног С.Т., Громько Б.М., Постников И.Д. Выбор оптимальной формы поперечного сечения кольца торцевого уплотнения. /Груды VI научно-технической конференции "Уплотнения и вибрационная надежность центробежных машин": - Сумы, 1991 г., стр. 50-55.

3. Марцинковский В.С., Гриценко В.Г., Чернов А.Е., Лапоног С.Т. Торцовое уплотнение для центробежных компрессоров. /Труды VI научно-технической конференции "Уплотнения и вибрационная надежность центробежных машин":- Сумы, 1991 г., стр. 76-80.

4. Чернов А.Е., Марцинковский В.А., Громыко Б.М., Постников И.Д. Использование методов оптимизации при проектировании импульсных торцовых уплотнений. /Труды VII научно-технической конференции "Герметичность и вибронадежность насосов и компрессоров":- Сумы, 1993 г., стр.3-7.

5. Wladimir A. Marcinkowski, Aleksander E. Czernow, Czeslaw Kundera. Czolowe uszczelnienie impulsowe - optymalizacja konstrukcji. /"Sterowanie i napęd hydrauliczny", dwumiesięcznik naukowo-techniczny, organ stowarzyszenia inżynierów i techników mechaników polskich, Wrocław, Nr 2, 1995, 3-4.

6. Wladimir A. Marcinkowski, Wasyli S. Marcinkowski, Siergiej N. Novak, Aleksander E. Czernow. Nowe gazodynamiczne uszczelnienia. /"Sterowanie i napęd hydrauliczny", dwumiesięcznik naukowo-techniczny, organ stowarzyszenia inżynierów i techników mechaników polskich, Wrocław, Nr 2, 1995, 10-11.

7. Чернов А., Новак С.. Метод расчета импульсных газовых уплотнений. / International Conference Kielce University of technology research cooperation with academic and industrial institutions, 1995, p.153-161

8. А.с. СССР № 1513275. Щелевое уплотнение. Беда И.Н., Башкина А.А., Чернов А.Е.

9. А.с. СССР № 1521971. Щелевое уплотнение. Беда И.Н., Марцинковский В.А., Башкина А.А., Чернов А.Е.

10. А.с. СССР № 1620754. Щелевое уплотнение. Беда И.Н., Башкина А.А., Чернов А.Е.

11. А.с. СССР № 1642162. Уплотнение вала. Чернов А.Е., Лапоног С.Т.

12. А.с. СССР № 1645689. Торцовое импульсное уплотнение. Чернов А.Е., Лапоног С.Т.

13. А.с. СССР № 1707371. Торцовое уплотнение. Чернов А.Е., Лапоног С.Т., Башкина А.А., Громыко Б.М., Постников И.Д.

14. А.с. СССР № 1712717. Торцовое уплотнение. Бережной И.С., Шевченко С.С., Марцинковский В.А., Лапоног С.Т., Башкина А.А., Чернов А.Е.

#### 14. Анотація російською мовою

Чернов Александр Евгеньевич. Разработка и оптимизация импульсных торцовых уплотнений для быстроходных турбонасосных агрегатов.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

регатов.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.13 - гидравлические машины и гидропневмоагрегаты, Сумский государственный университет, Сумы, 1995г.

Защищается 7 научных работ, 7 авторских свидетельств СССР, которые содержат результаты экспериментальных и теоретических исследований импульсных торцовых уплотнений с упругим вторичным уплотнителем, предназначенные для герметизации роторов быстроходных турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей. Установлено, что при больших давлениях уплотнительные кольца с металлической упругой манжетой подвержены деформациям, в результате чего уплотнения теряют работоспособность. Учитывая чрезвычайно тяжелые условия эксплуатации, необходимо тщательно выбирать геометрию торцовой пары. Разработана инженерная методика минимизации деформаций колец торцовой пары, решена задача оптимизации геометрии уплотнительных колец. Выполнены промышленные испытания импульсного торцового уплотнения с металлическим вторичным уплотнителем в жидком азоте ( $t=-195^{\circ}\text{C}$ ), при сверхвысоких рабочих параметрах ( $p_v=400$  Мпа м/с), приводятся данные о высоких эксплуатационных качествах таких уплотнений.

Ключові слова:

імпульсні торцеві ущільнення, металева пружна манжета, деформації ущільнювальних кілець, оптимізація геометрії кілець торцевої пари.

**15. Анотація англійською мовою**

Chernov Alexander E. Working out and optimization impulse face seals for high-speed turbopump units.

Dissertation allows on seeking a scientific grade of candidate of technical science on speciality 05.04.13 - hydromachinery and hydro-pneumounits, Sumy State University, Sumy, 1995.

Defenses 7 scientific works, 7 inventions of USSR which contains results of experimental and theoretical researches of impulse face seals with metal elastic secondary seals for high-speed turbopump units of liquid rocket engines. By pressure sealing ring with elastic secondary seals has big deformation and as result such impulse face seals can't works. Take account very hard operating conditions it's necessary select geometry of sealing ring with high accuracy. Worked out engineer method of minimization deformation of sealing rings of face seals, created optimization method of geometric parameters such sealing rings. Carry out experimental

researches of impulse face seals with metal elastic secondary seal in liquid nitrogen ( $t=-195^{\circ}\text{C}$ ) under superhigh duty parameters ( $p_v=400\text{ МПа м/с}$ ), shows data about excellent operating characteristics of such seals.

Підписано до друку 01.08.1995 р. Формат 60 x 84 1/16  
Обсяг 1.0 друк. арк. Тираж 100 екз.

---

Надруковано в Сумському державному університеті  
м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

115-29 25

