

ВІДГУК

офіційного опонента кандидата технічних наук **Гадяки Володимира Григоровича** на дисертаційну роботу **Гудкова Сергія Миколайовича** «Торцеве сальникове ущільнення з гідродинамічним розвантаженням пари тертя», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – "Динаміка та міцність машин"

Актуальність теми дисертації обумовлена важливістю проблеми герметизації роторів відцентрових турбомашин. Ущільнення є одним із важливих вузлів відцентрових компресорів та насосів, якість роботи якого впливає на ресурс, надійність та ефективність машин. Разом з цими факторами важливим питанням роботи ущільнення є забезпечення мінімальних витоків. Особливо це стосується насосів, що перекачують радіоактивні, токсичні та вибухонебезпечні речовини. Тому проектування удосконалених типів ущільнень та розвиток методів їх розрахунку залишається актуальним завданням.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі загальної механіки і динаміки машин Сумського державного університету відповідно до держбюджетних тем «Торцеве сальникове ущільнення з гідродинамічним розвантаженням пари тертя» (державна реєстрація № 0108U002233) і «Дослідження робочого процесу та розробка теорії нових енергоефективних та ресурсозберігаючих конструкцій ущільнень відцентрових машин» (державна реєстрація № 0113U000135), де здобувачем виконувались окремі розділи.

Основні теоретичні результати, які здобув особисто дисертант, і які складають наукову новизну, полягають у наступному:

- вперше експериментально встановлена та теоретично обґрунтована доцільність застосування гідродинамічного розвантаження пари тертя торцевого сальникового ущільнення (ТСУ);

- вперше розроблена методика числового розв'язання задачі пружногідродинамічного змащення торцевого сальникового ущільнення;

- експериментально визначені трибомеханічні властивості сальникової набивки, які дають можливість отримати модуль пружності та коефіцієнт Пуассона, а також початковий зазор, які необхідні для розв'язання задачі пружногідродинамічного змащення торцевого сальникового ущільнення;

- вперше виконано оцінку динамічних характеристик торцевих

сальникових ущільнень та досліджено вплив кута встановлення пружних стрижнів на статичні характеристики саморегульованого торцевого сальникового ущільнення.

Практичне значення роботи полягає в вирішенні важливої проблеми підвищення довговічності та герметичності торцевих сальникових ущільнень за рахунок гідродинамічного розвантаження пари тертя, а також в розробці нових конструкцій ущільнень такого типу. Розроблена в процесі виконання роботи методика числового вирішення задачі пружногідродинамічного змачення та методика інженерного розрахунку дозволяє проектувати більш ефективні конструкції ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя в залежності від конкретних умов роботи.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в СКБ ПАТ «Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе» та ТОВ «ТРИЗ» (м. Суми) при проектуванні та модернізації відцентрових насосів, що підтверджується відповідними актами.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі Сумського державного університету а також реалізовані при виконанні робіт з держбюджетних тем «Торцеве сальникове ущільнення з гідродинамічним розвантаженням пари тертя» і «Дослідження робочого процесу та розробка теорії нових енергоефективних та ресурсозберігаючих конструкцій ущільнень відцентрових машин».

Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення, висновки і рекомендації є **достатньо обґрунтованими**, в повній мірі опубліковані в фахових журналах, а також у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій, не мають дублюючих наукових висновків. Їх **достовірність** забезпечується застосуванням класичних методів теорії коливань при визначенні частот власних та амплітуд вимушених коливань, експериментальними методами, що дозволили оцінити ефективність нових конструкцій торцевих сальникових ущільнень. Вірогідність результатів комп'ютерного моделювання при числовому рішенні задачі забезпечена використанням ліцензійного програмного комплексу ANSYS Academic Research CFD 12.1 в вигляді технології Fluid-Structure Interaction, в якій реалізовано рішення спільної задачі напружено-деформованого стану с гідродинамічним розрахунком.

Аналіз структури та змісту дисертації

Дисертаційна робота містить 154 сторінки друкованого тексту і складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, що включає 112 найменувань, 102 рисунків, 8 таблиць та 1 додатку. Загальний обсяг роботи - 136 сторінок, що відповідає вимогам до кандидатських робіт.

У **вступі** розкрита актуальність теми, показано суть і сучасний стан

проблеми, що розглядається, дано обґрунтування роботи, наукової та практичної новизни, сформульовано мету дослідження, вказано яку апробацію пройшла дисертація.

У **першому розділі** представлений аналіз основних конструкцій контактних та безконтактних ущільнень, що використовуються у відцентрових насосах та компресорах. Описано принцип дії, приведена класифікація торцевих механічних ущільнень за конструктивними особливостями пружних елементів та пари тертя, способом підводу ущільнювального середовища, матеріалу кілець і т.п. Відзначено, що для низьких значень показника навантаження ($PV < 10$ МПа·м/с) істотні переваги за техніко-економічними показниками мають торцеві сальникові ущільнення, які поєднують в собі принцип дії торцевих механічних та радіальних сальникових ущільнень. За результатами аналізу зроблено висновок, що головним недоліком торцевих сальникових ущільнень є нерівномірність розподілу контактного тиску по радіусу пари тертя, що призводить до зниження їх герметичності та довговічності. Для усунення цих недоліків в ТСУ необхідно створити додатковий гідродинамічний тиск в парі тертя.

На основі проведеного огляду літератури було обґрунтовано мету і задачі досліджень, обрано теоретичні, експериментальні та комп'ютерні методи розв'язання поставлених задач.

У **другому розділі** представлені результати експериментальних досліджень ущільнення традиційної конструкції і двох різних типів сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя: з трапецієвидними канавками на дні обойми під сальниковою набивкою і замкнутими канавками на торцевій поверхні опорного диску. Приведено схему та принцип дії експериментального стенда, представлені основні пробори, за допомогою яких вимірювались ущільнювальний тиск, а також тиск в гідродинамічних канавках, величина витоків, момент тертя, температура в парі тертя и частота обертання вала установки. Побудовані залежності розподілу гідростатичного та гідродинамічного тисків по радіусу пари тертя, витратні характеристики в залежності від ущільнювального тиску, визначені коефіцієнт тертя та потужність втрат на тертя. За результатами експериментальних досліджень зроблено висновок про ефективність запропонованих конструкцій ТСУ з гідродинамічним розвантаженням пари тертя.

У **третьому розділі** за допомогою прибору, виконаного на базі навчального штампувального преса отримані експериментальні значення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона для різних типів сальникових набивок в залежності від їх осьового навантаження. Отримані залежності відносної деформації набивок для трьох циклічних навантажень. Також за допомогою безконтактного профілографа Talysurf CCI-Lite визначено профіль шорсткості

контактної поверхні сальникової набивки.

У четвертому розділі з використанням фізико-механічних властивостей та шорсткості сальникової набивки, що експериментально отримані в розділі 3, виконано числове розв'язання задачі пружногідродинамічного змащення. Числові дослідження виконувались в програмному комплексі ANSYS Academic Research CFD 12.1 з використанням технології Fluid-Structure Interaction, в якій реалізовано спільне вирішення рівнянь теорії пружності та гідромеханіки. За результатами розрахунків для ущільнень з трапецієвидними канавками на дні обойми під сальниковою набивкою отримані залежності контактного тиску під дією гідростатичного та гідродинамічного тисків в серединній частині канавки та між канавками. Для нереверсивного ущільнення із замкнутими канавками на торцевій поверхні опорного диску розрахунковий тиск на виході із гідродинамічної канавки відрізняється від експериментальних даних лише на 2%, що підтверджує достовірність моделювання в комплексі ANSYS CFD. В результаті розрахунків нової конструкції ТСУ з реверсивними трапецієвидними канавками та оптимізації форми її канавок вдалося підвищити гідродинамічний тиск на виході з канавки, та отримати майже рівномірний розподіл тиску між канавками, що покращує ефективність роботи ущільнення.

У п'ятому розділі представлені результати ресурсних випробувань ТСУ з реверсивними канавками, оптимізація яких виконана в четвертому розділі. За результатами експериментальних досліджень отримані залежності витоків через ущільнення за 1000 годин випробувань, а також залежності витоків та температури обойми від величини ущільнювального тиску. Після припрацювання пари тертя через 200 годин роботи при ущільнювальному тиску 0,4 МПа витоків склали 1-4 мл за годину, що підтверджує ефективність нової конструкції.

У шостому розділі виконано динамічний аналіз ТСУ, а також статичний аналіз саморегульованого ТСУ. За результатами динамічного аналізу для ТСУ двох конструктивно різних насосів побудовані безрозмірні амплітудно-частотні характеристики в залежності від коефіцієнта згасання. Власні частоти осьових коливань ТСУ знаходяться значно вище робочої частоти обертання, що підтвердило відсутність резонансних режимів в процесі експлуатації. Також отримані аналітичні залежності для визначення втрат потужності на тертя для саморегульованого ТСУ. Наведений приклад розрахунку втрат потужності на тертя в залежності від кута встановлення стрижнів та ущільнювального тиску.

Висновки по роботі підсумовують результати дослідження в цілому. Вони у логічному порядку показують реалізацію поставлених задач.

В цілому, по роботі слід відмітити всебічність і різноплановість проведених досліджень. Кожен обраний автором метод досліджень виконує свою необхідну функцію при розв'язанні поставлених задач.

Зауваження до дисертації:

1. Коефіцієнт навантаження використовується в тексті дисертації неодноразово, а залежність для його визначення приведена тільки на сторінці 112.
2. С.52, рисунок 2.6 – для зручності аналізу залежність тиску краще було б представити відносно радіуса, як і на рисунках 2.5, 4.11, а не по ширині пари тертя.
3. В розділі 4 слід було представити сіткову модель ТСУ, а також вказати основні параметри моделі (режим течії, кількість розрахункових комірок, і т.д.)
4. В розділі 6 коефіцієнт демпфірування та питома теплоємність позначені одним символом c .
5. С.132 – не розшифровані змінні в формулі для залежності коефіцієнта навантаження від фізико-механічних властивостей набивки та розмірів податливого дна.

Зауваження до оформлення автореферату:

1. С. 5 – висновок про збільшення витоків при експериментальному дослідженні ТСУ з трапецієвидними канавками не обґрунтовано числовими даними або графіками.
2. С.5, рисунок 2 і 3 – величини p_c , p_s , F_e , що використовуються на рисунках не розшифровані в тексті автореферату.
3. С. 11, абзац 1 – висновок про 2% відмінність розрахункових і експериментальних даних не обґрунтовано числовими даними.
4. С.14, рисунок 16 і 17 – не розшифровані по тексту величини по осях X та Y.
5. С.14, рисунок 16 (тип А) – не зрозуміло, чому для першого варіанта розрахунку відносна амплітуда коливань ТСУ однакова для різних коефіцієнтів згасання, хоча форма амплітудно-частотної характеристики різна.
6. С.15, таблиця 3 – не вказана розмірність втрат потужності на тертя.

Зауваження, зроблені до дисертації та автореферату свідчать про багатогранність теми дисертації, мають здебільшого рекомендаційний характер і не зменшують наукової новизни, практичного значення, достовірності і обґрунтованості результатів, що виносяться дисертантом на захист. Таким чином дисертаційна робота заслуговує позитивної оцінки.

В цілому дисертаційна робота Гудкова С.М. є завершеним науковим дослідженням, що відповідає за темою, змістом, обраними об'єктом і предметом дослідження вимогам паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Зміст автореферату повністю відповідає змісту роботи та є ідентичним основним її положенням. Тексти дисертації та автореферату викладені на належному науковому рівні, їх оформлення здійснено згідно відповідних вимог. Загальні висновки дисертаційної роботи повністю відповідають меті проведеного в ній дослідження.

Вважаю, що Гудков Сергій Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент, канд. техн. наук, начальник
відділу газодинаміки, динаміки та міцності
машин ПАТ «Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе»

 В.Г. Гадяка

Підпис к.т.н. начальника відділу газодинаміки, динаміки та міцності
машин Гадяки В.Г. засвідчую:

Інспектор канцелярії

 В.Б. Сичова