

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Загорулько Андрій Васильович

УДК 621. 671: 62-762. 004.62

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ І РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ
І ПРОЕКТУВАННЯ ЧОЛОВИХ САЛЬНИКОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ РОТОРІВ НАСОСІВ**

05.05.17 - Гідравлічні машини і гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2001 Дисертацією є рукопис.
Робота виконана в Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Хворост Володимир Андрійович,
Сумський державний університет,
проректор з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Голубев Олексій Іванович,
фірма “Гідромаш - Герм” (м. Москва),
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент
Кочевський Микола Миколайович,
ВАТ Сумський завод “НАСОСЕНЕРГОМАШ”,

начальник відділу АСУ

Провідна організація:

Інститут проблем машинобудування
НАН України, м. Харків

Захист дисертації відбудеться 26 червня 2001 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету.

Автореферат розісланий “22” травня 2001 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Є.М.

Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За оцінками фахівців, близько 60% всіх викидів в атмосферу складають витоки через ущільнення машин і трубопровідних систем. Враховуючи, що кількість насосів, які експлуатуються в Україні, сягає сотень тисяч, і їх робота супроводжується витоками, це призводить до значного забруднення навколишнього середовища, а також втрат не тільки мільйонів тонн цінної сировини, хімічних і харчових продуктів, паливно-мастильних матеріалів, прісної води тощо, але й великої кількості електроенергії. Крім того, величезні кошти витрачаються на утилізацію витоків. Тому проблема герметизації обертового вала насосів є однією з найбільш важливих і складних задач, що постає при розробці насосного обладнання.

Традиційні радіальні сальникові ущільнення вже не задовольняють тим вимогам по ресурсу і герметичності, що висуваються до них промисловістю, а поширення чолових механічних ущільнень стримується їхньою високою вартістю. Досить вдалою альтернативою цим типам контактних ущільнень є чолові сальникові ущільнення (ЧСУ), що об'єднують у собі простоту і дешевину радіальних сальників із високою герметичністю і довговічністю чолових механічних ущільнень.

До останнього часу не існувало прийнятних методів розрахунку та проектування чолових сальникових ущільнень. Це пов'язано, насамперед, із відсутністю досліджень процесів, що відбуваються у чоловій парі. Між тим, підвищення технічного рівня набивочних ущільнень потребує детального дослідження процесу герметизації. Тому, тема дисертації, присвячена дослідженню механізму герметизації і розробці методів розрахунку і проектування нових ефективних конструкцій чолових сальникових ущільнень, призначених для роботи в широкому діапазоні робочих параметрів, є актуальною.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є створення на основі експериментальних і теоретичних досліджень механізму тертя і герметизації нових конструкцій чолових сальникових ущільнень, що забезпечують підвищення ресурсу і зниження витоків ущільнюваного середовища в широкому діапазоні робочих параметрів.

Задачі досліджень:

- створення методики й устаткування для проведення експериментальних досліджень чолових сальників;
- експериментальне дослідження режимів тертя і механізму герметизації в

- чолових сальниках, випробування різноманітних конструкцій ущільнень і різноманітних типів сальникових набивок;
- розробка фізичної і математичної моделей герметизації чолових сальникових ущільнень;
 - розробка методів розв'язання задачі гідропружності сальникової набивки і теоретичне обґрунтування фізичних процесів у контактній парі;
 - вибір найбільш перспективної конструкції чолового сальникового ущільнення;
 - розробка інженерної методики розрахунку і проектування чолових сальникових ущільнень;
 - лабораторні та промислові випробування нових конструкцій чолових сальників.

Методи досліджень. Експериментальна оцінка працездатності нових конструкцій як одинарних, так і подвійних чолових сальникових ущільнень заснована на вивченні інтегральних характеристик процесу герметизації: герметичності, режимів тертя і теплового стану вузла, що дозволяє обійтися без тривалих ресурсних випробувань.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше теоретично й експериментально досліджено механізми тертя і герметизації в чолових сальниках. Розроблено фізичну і математичну модель герметизації, в якій ураховані: закони течії рідини через чолову щілину і пористе середовище, напружено-деформований стан ущільнювача, показники проникності і мікрогеометрії пористого середовища. Вперше отримані аналітичні залежності для визначення співвідношення довжини ділянок зазору і контакту, витоків, витрат потужності на тертя і максимальних контактних тисків. Запропоновані методи чисельного й аналітичного розв'язання задачі гідропружності сальникової набивки. Розроблено інженерну методику розрахунку і проектування чолових сальникових ущільнень.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Достовірність отриманих теоретичних закономірностей процесів тертя і герметизації гарантується тим, що вони засновані на класичних законах механіки суцільних середовищ і трибомеханіки, а також на повторюваності результатів експериментальних досліджень із використанням сучасних засобів вимірювань. Запропоновані в роботі висновки і практичні рекомендації підтверджуються лабораторними і промисловими випробуваннями нових конструкцій ущільнень, створених на основі результатів виконаних досліджень.

Наукове значення роботи полягає в тому, що досліджено закономірності процесів, які відбуваються у контактній парі чолового ущільнення з податливою сальниковою набивкою, що дозволяє більш обґрунтовано підходити до розробки, розрахунку і проектування нових конструкцій чолових сальників. Крім того, використані підходи і методи, виявлені закономірності і механізми можуть бути корисними при дослідженнях і розробці інших типів контактних ущільнень роторів насосів: чолових механічних і радіальних сальникових.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі аналізу механізму тертя і герметизації розроблені і впроваджені нові ефективні конструкції чолових сальників із вирівнюванням контактного тиску, що забезпечують підвищення ресурсу і зниження витоків перекачуваного середовища. Переваги нових конструкцій підтверджуються відповідними актами впровадження і результатами промислових випробувань, проведених на Одеському припортовому заводі і Сумському молокозаводі. Розроблено оригінальне стендове устаткування і методики експериментального визначення фізико-механічних властивостей сальникових набивок і комплексних випробувань чолових сальників. Запропонована інженерна методика розрахунку і проектування дозволяє розраховувати ЧСУ для різноманітних робочих середовищ і

режимних параметрів.

Рекомендації, інженерна методика розрахунку і проектування, а також нові конструкції використані інжиніринговою фірмою “ТРИЗ” при розробці конструкцій ЧСУ для насосів КС 25/40 і ФГ 144/46.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень механізму тертя і герметизації впроваджені в навчальний процес на кафедрі “Загальної механіки і динаміки машин” Сумського державного університету і складають основу спецкурсу “Теоретичні основи і конструкції сальникових ущільнень”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботі [2] здобувач провів аналіз існуючих конструкцій радіальних і чолових сальників. У роботах [3,4] їм запропоновані результати порівняльних досліджень одинарних чолових сальників традиційної конструкції і конструкції з вирівнюванням контактного тиску. Питання прогнозування надійності сальникових ущільнень розглянуті здобувачем у роботі [5], а у роботі [6] описана експериментальна установка для досліджень подвійних чолових сальників з валом, що обертається, та досліджена ефективність нових перспективних конструкцій чолових сальників із вирівнюванням контактного тиску; запропоновано дві нові типи конструкції чолових сальників для роторів насосів. У роботі [9] автор пропонує фізичну модель механізму герметизації і методику розрахунку контактних тисків методом скінченних елементів за експериментально отриманим розподілом гідростатичного тиску в зазорі. У роботі [11] здобувачем запропонована конструкція зі східчастим дном і розроблений метод визначення геометрії східчастого дна з умови забезпечення площинності контакту, у роботі [13] пропонується метод наближеного аналітичного розрахунку контактного тиску на чоловій ущільнюваній поверхні набивки. У роботі [14] здобувачем подані експериментальні установки і результати статичних і динамічних випробувань одинарних і подвійних чолових сальників, а також описана патронна конструкція чолового сальника для сітьового насоса. У роботі [15] автором розроблено математичну модель механізму тертя і герметизації чолового сальника, запропоновано метод розрахунку співвідношення довжин ділянок зазору і контакту, розподілів гідростатичного і контактного тисків по ширині пари тертя, витоків, витрат потужності на тертя; проведений порівняльний чисельний аналіз традиційної конструкції і конструкції з податливим дном, подане порівняння експериментальних і теоретичних результатів. Постановка задач, аналіз, трактування й узагальнення результатів проведено разом із науковим керівником і, частково, з співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: VIII міжнародній науково-технічній конференції “Насоси-96”, м. Суми, 1996 р.; VIII міжнародній конференції “Seals and sealing technology in machines and devices”, м. Вроцлав, Польща, 1998 р.; міжнародній конференції “Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва”, м. Київ, 1998 р.; V міжнародному симпозиумі “Energy and environmental aspects of tribology”, м. Краків, Польща, 1998 р.; XI міжнародній конференції “Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen”, м. Штайнфурт, Німеччина, 1999 р.; IV міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків, м. Львів, 1999 р.; IV українській науково-технічній конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”, м. Суми, 1999 р.; IX міжнародній науково-технічній конференції “Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання”, м. Суми, 1999 р.; V українській науково-технічній конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”, м. Київ, 2000 р.; XVI міжнародній науково-технічній конференції “Fluid sealing. Successful sealing”, м. Брюгге, Бельгія, 2000 р.

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 9 доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і 6 статей у

науково-технічних журналах. У фахових виданнях, затверджених переліком ВАК України, опубліковано 5 статей.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'ятих розділів, висновків, списку літератури з 103-х найменувань і додатків. Обсяг роботи (без додатків) 169 сторінок, у тому числі 3 таблиці і 81 рисунок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми з точки зору розв'язання проблем ресурсо- і енергозбереження, а також екологічної безпеки насосного устаткування. Сформульовано мету і задачі досліджень, подається загальна характеристика дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто показники надійності та основні вимоги, які висувуються до сальникових ущільнень. Показано, що при заданих умовах експлуатації процес герметизації, а отже і ресурс сальникового ущільнення, визначається конструкцією і характеристиками набивки.

На основі вивчення типових конструкцій радіальних сальникових ущільнень показано, що традиційна конструкція сальникового ущільнення не задовольняє висунутим до неї вимогам по ресурсу, герметичності й економічності через нерівномірність розподілу контактного тиску по довжині пакета набивки.

Розглянуто конструкції чолових сальникових ущільнень, у яких усуваються всі основні недоліки радіальних сальників: вплив сили тертя на контактний тиск, необхідність постійного обслуговування і підтяжки набивки, чутливість до несоосностей і биття валу, складність задачі тепловідведення. Незважаючи на це, працездатність існуючих чолових сальників забезпечується в досить обмеженому робочому діапазоні: при тиску нейтральних рідин до 0,7 МПа і швидкості ковзання до 10 м/с. Не забезпечується працездатність подвійних чолових сальників.

Аналіз сучасних сальникових набивок провідних фірм показав, що існують якісні набивки на основі тефлонового (PTFE), арамідного і вуглецевого волокна, виконані методом діагонального (діаплекс, мультифлекс) плетіння, з насиченням емульсією PTFE і дрібнодисперсного графіту, які здатні значно підвищити надійність і герметичність сальникових ущільнень. Проте підприємства виготовлювачі набивок не визначають і не наводять у переліку технічних характеристик такі важливі для розрахунку дані, як модуль пружності, коефіцієнт бічного тиску і коефіцієнт тертя.

Фізико-механічні характеристики сальникової набивки залежать від абсолютних розмірів перетину і розміру прикладеного навантаження. Набивка виявляє пластичні властивості, має повзучість, релаксацію напружень, є анізотропним матеріалом.

Стендове устаткування і методики досліджень окремих характеристик процесу тертя і герметизації: моменту тертя, витоків, температури, контактного тиску, розподілу гідростатичного тиску в зазорі, - досить добре розроблені, але комплексне одночасне визначення цих величин не провадилося. Розроблено новий підхід до оцінки працездатності конструкцій ущільнень, що не потребує тривалих і дорогих ресурсних випробувань, у якому за основні критерії прийняті не показники надійності, а характеристики процесу герметизації.

Аналіз теоретичних досліджень показує, що досить добре розроблена теорія радіальних сальникових ущільнень. Великі теоретичні й експериментальні дослідження, проведені Денні і Турнбуллом, Томсоном, Гафтом, дозволили встановити ряд закономірностей, пов'язаних із механізмом герметизації, особливостями тертя і змащення. Проте, не повністю вирішена задача гідропружності сальникової набивки, відсутні методи розрахунку розмірів ділянок зазору і контакту, потрібен розрахунок факторів навантаження, здатних забезпечити мінімальне тертя при допустимих витках. Відсутні дослідження механізму герметизації і методика розрахунку чолових сальників.

Другий розділ присвячений статичним випробуванням чолових сальників: визначенню фізико-механічних властивостей перспективних сальникових набивок і експериментальним дослідженням механізмів тертя і герметизації.

Випробування набивок здійснювалися на оригінальній установці, що не потребує використання тензOMETричної апаратури, сконструйованої на базі механічного пресу. Прилад дозволяє визначати такі фізико-механічні властивості як модуль пружності, коефіцієнти Пуассона і бічного тиску. Дослідження підтвердили висновки попередників про те, що фізико-механічні властивості сальникових набивок залежать від прикладеного навантаження, причому коефіцієнт Пуассона зменшується, а модуль пружності зростає при збільшенні навантаження. Крім того, спостерігається ефект пружного зміцнення матеріалу набивки.

Експериментальні дослідження механізмів тертя і герметизації в статичі проведені на порівняно простій і оригінальній установці (рис.1), що дозволяє вимірювати розподіл тиску в зазорі, момент тертя і витоки в залежності від навантаження і від величини ущільнюваного тиску для чолових сальників із внутрішнім і зовнішнім підводом.

Рис. 1. Установка для статичних досліджень ущільнень

Перед випробуваннями набивка опресовувалася у місці установки протягом 10-15 хвилин тиском до 6,6 МПа. Потім вимірювалися осьові деформації в залежності від навантаження. На ділянці тиску до 2 МПа крива $\varepsilon = f(p_{cm})$ досить добре апроксимується степеневою залежністю $\varepsilon = c \cdot p_{cm}^{2\beta}$. При тисках, більших 2 МПа, залежність між деформацією і навантаженням стає практично лінійною, тобто модуль пружності набивки на ділянці навантаження від 2,0 до 6,6 МПа можна вважати постійним.

Основний результат експериментів полягає у встановленні того факту, що з боку ущільнюваного тиску набивка відтискується від опорного диска, створюючи конфузорний зазор. На ділянці безпосереднього контакту, що залишається, виникає контактний тиск, який забезпечує виконання умови рівноваги. Ця ділянка контакту набивки з опорною поверхнею диска виконує основну роль у процесі герметизації і є істотно перевантаженою. Витоки обумовлені, в основному, фільтраційною течією через мікролабіринти в парі тертя.

Виміри гідростатичного тиску P_s по ширині пари тертя показали, що гідростатична сила F_s (площа під кривою P_s) врівноважує приблизно 30-40 % зовнішнього навантаження N . Інша частина врівноважується силою контактного тиску F_c . Довжина ділянки зазору і гідростатичний тиск P_{s0} на межі ділянок зазору і контакту збільшуються із зменшенням модуля пружності і при підвищенні ущільнюваного тиску, а при збільшенні коефіцієнта навантаження зменшуються.

Коефіцієнт тертя зменшується при підвищенні ущільнюваного тиску, що пов'язано зі зменшенням контактного навантаження.

Витратні характеристики показують, що стабільна робота чолових сальників із краплинними витоками забезпечується коефіцієнтами навантаження, близькими до одиниці. У цьому одна з відмінностей чолових сальників від механічних чолових ущільнень. При малих коефіцієнтах навантаження ущільнювана рідина проникає під набивку і видавлює її з обойми.

В роботі запропоновані нові перспективні конструкції чолових сальників зі східчастим і податливим дном, у яких завдяки можливості модифікації епюр контактних і гідростатичних тисків, за рахунок деформації набивки в місці проточки дна обойми з боку низького тиску середовища, здійснюється зниження сили контактного тиску, зменшується тертя при збереженні необхідної герметичності.

У третьому розділі розглянуто результати експериментальних досліджень чолових сальників при обертанні вала, досліджено процес припрацювання і запропоновано

методику комплексних випробувань процесів тертя і герметизації.

Робота ущільнення з валом, що обертається, досліджувалася на стенді динамічних випробувань, експериментальна головка якого (рис. 2) містить два коаксіально розташованих чоловічих сальника 5 і 6 з незалежним навантаженням на кожний.

Випробування одинарної конструкції здійснювалися при знятій аксіально-рухомій втулці 4. Установка дозволяє визначати момент тертя, витоки і температуру в контакті при зміні ущільнюваного тиску від 0,2 до 1,6 МПа і коефіцієнта навантаження від 0,8 до 2,0.

Рис. 2. Прилад для досліджень чоловічих сальникових ущільнень

Експерименти з обертним валом підтвердили основні закономірності, отримані на установці без обертання. Визначено робочу область узагальненої характеристики одинарного чоловічого сальника. Вона обмежується двома кривими: - кривою, відповідною коефіцієнтам навантаження близьким до $k_p=1,05$, при зменшенні яких збільшуються витоки і видавлюється набивка; - кривою, відповідною граничним коефіцієнтам навантаження, при збільшенні яких різко зростає момент тертя і температура в контакті. Робота чоловічого сальника на ділянці контакту здійснюється в режимі змішаного тертя. Перехід до граничного тертя пов'язаний із місцевими підвищеннями температури в контакті.

Збільшення частоти ω обертання ротора супроводжується зростанням витрат потужності на тертя $N_r = M_r \omega$ і відповідним збільшенням температури в парі тертя. Одночасно збільшується і момент тертя.

Прості заходи щодо вирівнювання контактного тиску усувають нерівномірний знос опорного диска і розширюють верхню межу робочих параметрів одинарних чоловічих сальників до $k_{pp}v= 20-25$ МПагм/с. При цьому і температура, і витоки в конструкції з податливим дном значно менші, ніж у традиційній конструкції. Якщо виконується вимога $k_p= 1,0$, то витоки в діапазоні швидкостей ковзання до $v \leq 12,2$ не перевищують 0,25 л/год.

Випробування запропонованих у роботі нових конструкцій подвійних чоловічих сальників (конструкція з вирівнюванням контактного тиску) коаксіального розташування показали, що витрати запираючої води в ущільнювальну камеру не виходять за межі $q_e \leq 0,4$ л/год, якщо коефіцієнт навантаження першої сальника $k_{p1} \leq 1,15$. При цих умовах зберігається також нормальний тепловий стан ущільнення: підвищення температури контакту t_c

відносно температури t_0 ущільнюваного середовища становить $\Delta t \leq 10^0$ С.

Для комплексних випробувань одинарних і подвійних чоловічих сальників створена оригінальна експериментальна установка на базі машини тертя МДП-1, яка дозволяє одночасно вивчати процеси тертя, герметизації і припрацювання. В процесі експериментів установлено, що в результаті припрацювання стабілізуються температура, витоки і коефіцієнт тертя, а також зменшується ділянка безпосереднього контакту за рахунок збільшення сили гідростатичного тиску. Досліджено вплив податливості дна на робочі характеристики ущільнення. Отримані узагальнені дані про оптимальні коефіцієнти навантаження для подвійних чоловічих сальникових ущільнень. Проведено випробування подвійних чоловічих сальників із запиранням повітрям і підтверджена принципова можливість нормальної роботи таких ущільнень.

У четвертому розділі викладена теорія чоловічих сальникових ущільнень. Пара тертя чоловічого сальника, що складається з аксіально-рухомою обойми 1 із набивкою 2 і жорстко закріпленого опорного диска 3, і схема навантажень подані на рис. 3.

Рис. 3. Схема навантажень до розрахунку контактних тисків

Подібно механізму герметизації радіального сальникового ущільнення, запропонований механізм герметизації чолового сальника у вигляді течії рідини через два послідовних дроселі: чолову щілину і пористий прошарок. Як пористий прошарок товщиною H виступає поверхня набивки, що контактує з опорним кільцем. Контакт набивки з опорним кільцем являє собою суму плям фактичного контакту, між якими знаходяться мікроділянки, заповнені рідиною. Гідравлічний опір ділянки контакту складається з гідравлічного опору звивистих мікроканалів.

З урахуванням фізичної моделі механізму герметизації знайдено наближене розв'язання статичної задачі гідропружності для набивки чолового сальника. Набивка розглядається як попередньо стиснене пружне тіло. З умови спільності осьових деформацій пружних елементів і набивки визначена та частина ΔF_2 сили тиску ущільнюваної рідини

$F_e = p_1 A_e$, що передається на набивку і врівноважується силою F_s гідростатичного

тиску в зазорі і силою F_c додаткового контактного тиску:

$$\Delta F_2 = \chi F_e = F_s + F_c, \quad \chi = k_2 / (k_1 + k_2), \quad (1)$$

де χ - коефіцієнт передачі, або коефіцієнт основного навантаження, що показує, яка

частина зовнішньої F_e сили передається на набивку; k_1, k_2 - коефіцієнти жорсткості пружних елементів і набивки відповідно.

З урахуванням співвідношення $\eta_0 = A_{r0} / A_{a0}$, де A_{r0} - фактична і A_{a0} - номінальна площі контакту при попередньому контактному тиску p_{c0} , шляхом спільного розв'язання рівнянь осьової деформації набивки і рівнянь напірної радіальної течії, отримані розподіли гідростатичного тиску на ділянках зазору і контакту у вигляді

$$p_s = (p_1 - p_{cr0}) \cdot \left(\frac{r - r_s}{b_s} \right)^{1/4} + p_{cr0}, \quad (2)$$

$$p_s = p_{s0} \cdot \left(\frac{r - r_2}{b_c} \right), \quad (3)$$

де $b_s = r_1 - r_s$ - ширина кільцевої смужки, на якій утвориться зазор між набивкою й опорним кільцем, $b_c = r_s - r_2$ - ширина кільцевої смужки контакту, r_s - радіус, що відповідає межі ділянок зазору і контакту, $p_{s0} = p_{cr0}$ - гідростатичний і контактний тиски на межі ділянок зазору і контакту.

Закон зміни зазору по радіусу:

$$h(r) = b \frac{p_1 - p_{cr0}}{E^*} \left(\frac{r - r_s}{b_s} \right)^{1/4}, \quad (4)$$

де E^* - приведений модуль пружності, отриманий при опресуванні набивки.

Зміна витоків з урахуванням степеневі залежності $\varepsilon = c \cdot p_{cm}^{2/\beta}$ перетину лабіринтових каналів від контактної тиску визначиться по формулі, подібній формулі для радіальних сальникових ущільнень:

$$q = q_* \frac{p_{s0}}{p_{s0*}} \cdot \left[\frac{1 - \eta_* \cdot \left(\frac{\delta \bar{p}_c}{\delta \bar{p}_{c*}} \right)^{2/\beta}}{1 - \eta_*} \right]^3 \frac{b_{c*}}{b_c}. \quad (5)$$

З умови нерозривності потоку уздовж двох послідовно сполучених дроселів: чолову щілину і пористий прошарок, отримане співвідношення довжини зазору до довжини контакту

$$\frac{b_s}{b_c} = \frac{1}{48 \cdot k_1 \cdot H_0 \cdot \left(1 - \eta_* \cdot \left(\frac{\delta \bar{p}_c}{\delta \bar{p}_{c*}} \right)^{2/\beta} \right)^3} \cdot \left(\frac{b}{E^*} \right)^3 \cdot \frac{(p_1 - p_{c0}/\eta_0)^4}{p_{c0}/\eta_0}, \quad (6)$$

де k_1 - коефіцієнт проникності пористого прошарку.

Введено параметр герметичності ущільнення Ω , який залежить від мікрогеометрії пористого прошарку і визначається експериментально за витокami і гідростатичним тиском в зазорі

$$\Omega = \frac{q_*}{p_{s0*}} \cdot \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{r_{s*}}{r_2} \right). \quad (7)$$

Інтегруванням тиску (2) по зазору і тиску (3) по площі фактичного контакту, отримані відповідні сили гідростатичного тиску:

$$F_{ss} = 1,6\pi r_s b_s (p_1 - p_{cr0}) \left(1 + \frac{5 b_s}{9 r_s} + \frac{5 r_m}{4 r_s} \frac{p_{cr0}}{p_1 - p_{cr0}} \right), \quad (8)$$

$$F_{sc} = \pi \cdot p_{s0} \cdot b_c \cdot r_2 \cdot (1 - \eta) \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{b_c}{r_2} \right). \quad (9)$$

З умови рівноваги визначена додаткова сила F_c контактної тиску, що діє на кільцевому пояску контакту набивки з опорним кільцем

$$F_c = \chi F_e - (F_{ss} + F_{sc}), \quad (10)$$

а також додатковий і сумарний середній контактні тиски

$$\delta \bar{p}_c = \frac{p_1}{1 - \alpha} \left[k\chi - 0,8\alpha \left(1 - \frac{p_{s0}}{p_1} \right) - 0,5\beta \frac{p_{s0}}{p_1} (1 - \eta) \right], \quad (11)$$

$$\bar{p}_c = p_{c0} + \delta \bar{p}_c, \quad (12)$$

де $\alpha = A_s/A_0$, $\beta = A_c/A_0$, $A_s = 2\pi r_s b_s$, $b_s = r_1 - r_s$, $k = A_e/A_0$.

З умови радіальної рівноваги кільця сальникової набивки отримано вираз для коефіцієнта

навантаження, що забезпечує формування ділянок зазору і контакту:

$$k = \frac{0,8}{\chi} \left(1 - \frac{P_{cr0}}{P_1} \right) \left(1 + \frac{5 b_s}{9 r_s} + \frac{5 r_m}{4 r_s} \frac{P_{cr0}}{P_1 - P_{cr0}} \right) \quad (13)$$

Потужність тертя на ділянці безпосереднього контакту оцінюється по середньому контактному тиску (10) при постійному коефіцієнті тертя f

$$N_c = N_{c0} \left[1 + \frac{P_1}{P_{c0}} \left(\frac{k\chi}{1-\alpha} - \frac{0,8\alpha}{1-\alpha} \left(1 - \frac{P_{s0}}{P_1} \right) - 0,5 \frac{P_{s0}}{P_1} (1-\eta) \right) \right],$$

$$N_{c0} = 0,5\pi f P_{c0} \omega b_c (r_s + r_2)^2. \quad (14)$$

де ω - частота обертання вала.

Оцінки показують, що втрати на рідинне тертя дуже малі, тому їх можна не враховувати. Запропоновано метод визначення геометрії податливого дна з умови забезпечення площинності контакту набивки й опорного диска, заснований на розв'язанні задачі деформування кільцевої пластинки. Отримано наближену аналітичну залежність коефіцієнта навантаження від фізико-механічних властивостей набивки і геометрії податливого дна.

Розв'язання задачі гідропружності здійснювалося як аналітично, так і чисельно методом

$$\left| \frac{P_{c0}^{(n)} - P_{c0}^{(n-1)}}{P_{c0}^{(n)}} \right| \leq 0,05$$

послідовних наближень (рис. 3). Розрахунок закінчується, коли

Для досягнення такої точності потрібно 3-4 послідовних наближення.

Метою чисельного розрахунку є визначення закону розподілу контактного тиску по радіусу чолового стику шляхом розв'язання контактної задачі методом скінченних елементів. Розрахункова схема, в основному, та ж, що і в аналітичному розрахунку. Розв'язувалася осесиметрична задача. Додатково враховані сили тертя на бокових стінках, що обмежують набивку, а для ущільнень із вирівнюванням контактного тиску особливості конструкції враховувалися в граничних умовах.

Проведений аналіз показав, що механізм тертя і герметизації визначається напружено-деформованим станом набивки під дією гідростатичного тиску і зовнішнього навантаження, і залежить від проникності пористого прошарку. Чисельним експериментом встановлено, що герметичність може забезпечуватися невеличкими

контактними тисками, порівнянними з контактними тисками P_{c0} початкового натиску пружинами. Розроблена методика інженерного розрахунку, яка дозволяє визначати необхідні зусилля пружин і коефіцієнти навантаження, які забезпечують допустимий рівень витоків для нових конструкцій чолових сальників. Методикою визначається розмір і кількість пружин, розраховується розподіл контактного тиску, визначаються втрати потужності на тертя, що обумовлюють тепловий режим і ресурс ущільнення. У конструкціях з податливим і східчастим дном вибирається геометрія дна.

У н'ятому розділі подані результати лабораторних і промислових випробувань, що підтвердили як ефективність інженерної методики розрахунку і проектування чолових сальників, так і нових конструкцій ущільнень. На підставі викладених вище результатів досліджень сформульовані основні вимоги, які потрібно враховувати при створенні нових конструкцій.

Промислові випробування чолових сальників показали, що вони значно переважають по герметичності і довговічності серійні конструкції радіальних сальникових ущільнень. Сумарний наробіток склав понад 8 тисяч годин. Підтверджено високий ресурс вузла (3-6 тисяч годин до заміни набивки) і його герметичність (витоки 0,03-0,1 л/год).

Найважливішим параметром, що визначає конструкцію і її експлуатаційні

характеристики, ϵ коефіцієнт навантаження. Експериментально встановлено і підтверджено теоретично, що оптимальні значення коефіцієнта навантаження складають:

для області низьких ущільнюваних тисків ($P_1 \leq 0,5$ МПа) - $k = 0,9 - 1,1$; для високих тисків ($P_1 > 0,5$ МПа) - $k \approx 1$.

У подвійних ущільненнях для запобігання можливого видавлювання набивки з обойми коефіцієнт навантаження для внутрішнього вузла повинен бути не менше 1,15. Для області низьких тисків кільце набивки можна використовувати одночасно і як вторинне ущільнення аксіально-рухомого кільця по валу. Краще використовувати конструкції з сальниковою обоймою, що обертається. Важливо виконувати також вимоги по монтажу: набивка повинна встановлюватися з натягом, опресовуватися і припрацьовуватися протягом 2-3-х годин.

На підставі проведених досліджень і випробувань розроблені типові конструкції одинарних і подвійних чолових сальникових ущільнень із вирівнюванням контактного тиску (із податливим і східчастим дном) для роторів насосів загальнопромислового призначення.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених експериментальних і теоретичних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Огляд сучасного становища сальникових ущільнень показав, що найбільш перспективними є чолові сальникові ущільнення, які за техніко-економічними показниками переважають традиційні радіальні сальники. Проведеними теоретичними й експериментальними дослідженнями процесів тертя і герметизації в чолових сальникових ущільненнях, встановлено, що існує значний ресурс для підвищення робочих параметрів і ресурсу таких ущільнень шляхом розробки нових конструкцій з вирівнюванням контактного тиску по радіусу пари тертя.
2. Розроблено оригінальне стендове устаткування і методики випробувань, які дозволяють визначати основні фізико-механічні властивості сальникових набивок, здійснювати комплексні дослідження процесів тертя і герметизації, визначати допустимі робочі параметри чолових сальників.
3. Експериментально досліджено основні закономірності процесів тертя і герметизації в залежності від ущільнюваного і контактного тисків, а також швидкості ковзання. Визначено робочу область узагальненої характеристики одинарного чолового сальника (діапазон припустимих коефіцієнтів навантаження) та досліджено процес припрацювання.
4. Розроблено нові конструкції чолових сальників із східчастим і податливим дном, у яких за рахунок можливості модифікації епюр контактних і гідростатичних тисків автоматично в залежності від ущільнюваного тиску і зовнішнього навантаження відбувається вирівнювання контактних тисків, знижується тертя і зношування, зменшуються витрати.
5. На підставі всебічних експериментальних досліджень розроблено фізичну модель механізму тертя і герметизації чолового сальникового ущільнення. Модель представляє чолову пару у вигляді двох взаємозалежних ділянок: безконтактної ділянки з конфузорним зазором і ділянки безпосереднього контакту набивки з опорною поверхнею. Зовнішня ділянка (з боку низького тиску середовища), на якій і здійснюється герметизація, виявляється істотно перевантаженою і піддається значному тертю і зношуванню. Контакт набивки з опорним кільцем являє собою суму плям фактичного контакту, між якими знаходяться мікроділянки, заповнені рідиною. Гідравлічний опір ділянки контакту складається з гідравлічного опору звивистих мікроканалів, а його

довжина визначається напружено-деформованим станом набивки під дією гідростатичного тиску в зазорі і зовнішнього навантаження. Ці припущення підтверджуються розподілом гідростатичного тиску в зазорі, візуальним спостереженням процесу зношування і течії рідини крізь контактну пару чолового сальника.

6. На основі розробленої математичної моделі герметизації, яка враховує закони течії рідини через чолову щілину і пористий прошарок, напружено-деформований стан ущільнювача, проникність пористого прошарку і фактичну площу контакту, сформульована статична задача гідропружності сальникової набивки і запропоновано методи чисельного і аналітичного її розв'язання. Отримано залежності для визначення довжини ділянок зазору і контакту, витоків і втрат потужності на тертя. Результати проведених чисельних і аналітичних розрахунків добре узгоджуються з експериментом, що дозволяє говорити про адекватність прийнятої фізичної моделі тертя і герметизації реальним процесам у чоловій парі. Запропонована теорія дозволила пояснити основні закономірності процесів, що відбуваються у чоловій парі і підтвердила перспективність конструкцій із податливим і східчастим дном.
7. Запропоновано методикку інженерного розрахунку і проектування чолових сальників, що дозволяє розраховувати ущільнення на різноманітні параметри ущільнюваного середовища і умов експлуатації. Методика розрахунку зводиться до визначення силових факторів (зусилля пружин і коефіцієнта навантаження) при допустимому рівні витоків і заданому ресурсі. Розраховується розподіл контактного тиску, і визначаються втрати потужності на тертя, які обумовлюють тепловий режим роботи і ресурс ущільнення.
8. Визначено необхідні умови монтажу й оптимальні коефіцієнти навантаження для одинарних і подвійних чолових сальників. Описано особливості проектування чолових сальників.
9. Розроблено типові конструкції одинарних і подвійних чолових сальників для різноманітних областей застосування зі збереженням основної переваги сальникового ущільнення: простоти конструкції і легкості перемонтажу. Одинарні чолові сальники успішно пройшли лабораторні та промислові випробування.
10. За техніко-економічними показниками (витоки, ресурс, витрати потужності на тертя, витрата набивки, витрати на ремонт і обслуговування) чолові сальники переважають радіальні, а їхня вартість і експлуатаційні затрати значно нижчі, ніж механічних чолових ущільнень.
11. Розрахунок економічної ефективності контактних ущільнень відцентрових насосів, в яких ущільнюваним або запираючим середовищем є вода, показав, що сумарні витрати на чолові сальник у 2-4 рази менші, ніж на радіальне сальникове ущільнення й у 2-7 разів менші, ніж на чолові механічне ущільнення. Основними статтями витрат, які впливають на економічність вузла, є витрати на електроенергію за рахунок витрат потужності на тертя, вартість ущільнення та ресурс його роботи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Загорулько А.В. Экспериментальная установка и экспериментальные исследования торцовых сальниковых уплотнений // Труды VIII-й Международной научн.-техн. конференции "Насосы-96". – Том 2. – Сумы. - 1996. - С. 113-121.
2. Марцинковский В.А., Загорулько А.В. Новые тенденции в конструировании сальниковых уплотнений вращающихся валов // Праці Міжнародної наук.-техн. конференції "Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва". – Том 3. – Київ. - 1998. – С.309-316.

3. Марцинковский В.А., Загорулько А.В. Исследования торцовых сальниковых уплотнений // Праці Міжнародної наук.-техн. конференції "Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва". – Том 3. – Київ. - 1998. – С.322-327.
4. Martsinkowsky V.A., Zagorulko A.V., Gaft J.Z., Kovalenko S.A. Cartridge designs of face packing seal with contact pressure equalization // Proc. VIII Int. Conf. "Seals and sealing technology in machines and devices". – Wroclaw (Poland). - 1998. – P.136-141.
5. Gaft J.Z., Zagorulko A.V. Experimental investigations of shaft/gland packing friction pair wearing characteristics // Problemy eksploatacji. – Radom (Poland). – 1998. - №3(30). – P.113-119.
6. Zagorulko A.V., Gaft J.Z. Stirnseitige Pakungsdichtungen der Zentrifugal pumpen und der Apparate chemischer Produktionen // Proc. XI Int. Conf. "Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen". – Мьнстер (Germany). - 1999. – P.235-250.
7. Загорулько А.В. Дослідження процесів тертя та герметизації в чоловому сальнику // Машинознавство. – 1999. - №8(26). – С.45-48.
8. Загорулько А.В. Экспериментальные исследования двойных торцовых сальниковых уплотнений // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". – 1999. - Машиностроение, т.1, выпуск 36. – С.136-143.
9. Загорулько А.В., Гафт Я.З. Исследование механизма герметизации и определение контактных давлений в торцовых сальниках // Труды IX Международной науч.-техн. конференции "Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования". – Том 1. – Сумы. - 1999. – С. 175-183.
10. Загорулько А.В. Экспериментальный стенд для комплексных исследований рабочих характеристик торцовых сальниковых уплотнений // Труды IX Международной науч.-техн. конференции "Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования". – Том 1. – Сумы. - 1999. – С. 184-188.
11. Удянский А.В., Чернов А.Е., Загорулько А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния кольца набивки торцового сальника // Труды IX Международной науч.-техн. конференции "Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования". – Том 1. – Сумы. - 1999. – С. 318-326.
12. Загорулько А.В. Визначення контактної тиску в чоловому сальнику методом скінчених елементів // Машинознавство. – 2000. - №2(32). – С.28-31.
13. Гафт Я.З., Загорулько А.В., Марцинковский В.А. Расчет контактного давления в набивке торцовых сальниковых уплотнений // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". – 2000. - Машиностроение, т.1, выпуск 38. – С.175-181.
14. Gaft J., Zahorulko A., Martsynkovskyy V., Shevchenko S. Face packing seals: new opportunities for pump rotor hermetic sealing // Proc. XVI Int. Conf. "Fluid sealing. Successful sealing". – Brugge (Belgium). - 2000. – P.335-349.
15. Хворост В.А., Загорулько А.В., Криворучко Д.В. Анализ теоретических и экспериментальных исследований торцовых сальниковых уплотнений // Вісник СумДУ. - 2000. - №19. – С. 27-37.

Аннотация

Загорулько А.В. Исследование механизма герметизации и разработка методов расчета и проектирования торцовых сальниковых уплотнений роторов насосов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. Сумский государственный университет, Сумы, 2001.

Работа посвящена вопросам создания новых конструкций торцовых сальниковых уплотнений, обеспечивающих повышение ресурса и снижение утечек перекачиваемой среды в

широком диапазоне рабочих параметров. Поставленная цель достигается путем теоретических и экспериментальных исследований механизма герметизации и разработкой методов расчета и проектирования с учетом процессов происходящих в торцовой паре.

Повышение технического уровня набивочных уплотнений требует детального исследования процесса герметизации. Обоснованный выбор нагружающих факторов из условия минимального трения и допустимого уровня утечек а также разработка и расчет конструкций с выравниванием контактного давления обеспечивает расширение диапазона рабочих параметров и повышение ресурса уплотнения.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы и приложений.

Во введении обосновывается актуальность темы, дается общая характеристика диссертационной работы.

Первый раздел посвящен анализу приведенных в литературе конструкций радиальных и торцовых сальниковых уплотнений а также направлений их совершенствования. Рассмотрены показатели надежности и основные требования, предъявляемые к сальниковым уплотнениям. Проведен анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований сальниковых уплотнений. Изучено известное стендовое оборудование и методы испытаний. Рассмотрены современные сальниковые набивки и методы определения их физико-механических свойств. Сформулированы основные задачи исследований.

Второй раздел посвящен статическим испытаниям торцовых сальников. Разработано экспериментальное оборудование, определены физико-механические свойства перспективных сальниковых набивок и исследованы механизмы трения и герметизации. Получены: распределение гидростатического давления в зазоре, величина момента трения и протечек в зависимости от нагруженности и величины уплотняемого давления. Исследовано влияние типа набивки и конструкции уплотнения на механизм трения и герметизации. Установлена значительная неравномерность контакта по ширине пары трения традиционной конструкции. Разработаны новые эффективные конструкции с выравниванием контактного давления (с податливым и ступенчатым дном), позволяющие уменьшать контактную нагрузку, а следовательно, и трение при допустимых протечках.

В третьем разделе рассмотрены результаты экспериментальных исследований торцовых сальниковых уплотнений при вращении вала. Разработан экспериментальный стенд и методика проведения динамических испытаний одинарных и двойных торцовых сальников. Исследован процесс приработки и предложена методика комплексных испытаний процессов трения и герметизации. Определена рабочая область обобщенной характеристики и предельные рабочие параметры торцового сальника. В результате применения конструкций с выравниванием контактного давления удалось существенно расширить диапазон рабочих параметров, уменьшить протечки и обеспечить работоспособность двойных торцовых сальников. Исследовано влияние податливости дна на рабочие характеристики уплотнения. Получены обобщенные данные об оптимальных коэффициентах нагрузки для двойных торцовых сальниковых уплотнений. Проведены испытания двойных торцовых сальников с запирающим воздухом и подтверждена принципиальная возможность нормальной работы таких уплотнений.

В четвертом разделе изложена теория торцовых сальниковых уплотнений. Разработана физическая и математическая модель процессов трения и герметизации с учетом фактической площади контакта микронеровностей и проницаемости пористой среды. Численно и аналитически, методом последовательных приближений, решена задача гидроупругости набивки в торцовом сальнике. Численно и аналитически определена необходимая геометрия податливого дна из условия обеспечения выравнивания контактного давления. Получены аналитические зависимости для определения протечек, потерь мощности на трение, протяженностей участков зазора и контакта. В качестве критерия определяющего работоспособность торцового сальника принята величина и характер распределения

контактного давления. Введен параметр герметичности уплотнения, который зависит от микрогеометрии пористого слоя и определяется экспериментально по протечке и гидростатическому давлению в зазоре. Разработана инженерная методика расчета и проектирования торцовых сальниковых уплотнений. Сравнение теоретических и экспериментальных данных, полученных в диссертационной работе, дало их удовлетворительное соответствие.

В пятом разделе представлены результаты лабораторных и промышленных испытаний. Сформулированы основные требования, которые необходимо учитывать при создании новых конструкций торцовых сальниковых уплотнений. Разработаны типовые конструкции одинарных и двойных торцовых сальников для роторов насосов общепромышленного назначения.

Ключевые слова: торцовое сальниковое уплотнение, сальниковая набивка, механизм герметизации, задача гидроупругости, гидростатическое давление, контактное давление, податливое дно, коэффициент нагрузки, потери мощности на трение.

анотація

Загорулько А.В. Дослідження механізму герметизації і розробка методів розрахунку і проектування чолових сальникових ущільнень роторів насосів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 - гідравлічні машини і гідропневмоагрегати. Сумський державний університет, Суми, 2001.

Робота присвячена питанням створення нових конструкцій чолових сальникових ущільнень, які забезпечують підвищення ресурсу і зниження витоків перекачуваного середовища в широкому діапазоні робочих параметрів шляхом теоретичних і експериментальних досліджень механізму герметизації. Розроблено експериментальне устаткування і методики випробувань для визначення фізико-механічних властивостей сальникових набивок, для проведення комплексних досліджень процесів тертя і герметизації. Створено нові конструкції чолових сальників із вирівнюванням контактної поверхні (із податливим і східчастим дном). Розроблено фізичну і математичну моделі тертя і герметизації, на основі яких розроблені інженерні методи розрахунку і проектування. Розроблено типові конструкції одинарних і подвійних чолових сальників роторів насосів.

Ключові слова: чолове сальникове ущільнення, сальникова набивка, механізм герметизації, задача гідропружності, гідростатичний тиск, контактний тиск, податливе дно, коефіцієнт навантаження, витрати потужності на тертя.

summary

Zagorulko A.V. Investigation of hermetic sealing mechanism and elaboration of calculation and engineering design methods of face packing seals for pumps' rotors. – The manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science in speciality 05.05.17 – hydraulic machines and hydraulic and pneumatic units. Sumy State University, Sumy, 2001.

This thesis is dedicated to problems of creation of new designs of face packing seals, which provide life time improvement and pumped medium leakage reduction within wide range of operating parameters by means of the theoretical and experimental investigations of hermetic sealing mechanism. The experimental equipment had been worked out and the techniques of testing to determine physical and mechanical characteristics of the packing stuffs for realization of integrated studies of friction and hermetic sealing processes had been elaborated. Face packing seals of advanced designs with contact pressure equalization (with deformable and stepped bottom) have been created. Physical and mathematical models of friction and hermetic sealing have been created, engineering approaches of calculation and designing have been elaborated on the basis of them. Standard designs of single and double face packing seals of pump rotors have been worked out.

Key words: face packing seal, packing stuff, mechanism of hermetic sealing, problem of hydroelasticity, hydrostatic pressure, contact pressure, deformable bottom, load factor, friction power losses.

Підп. до друку 21.05.2001 р.
Наклад 100 прим.
Замовл. № 201

Формат 60x90/16.
Обл.-вид. арк. 1,1.

“Ризоцентр” СумДУ, 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2