

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Загорулька Андрія Васильовича

«Наукові основи трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин»

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Актуальність теми та її зв'язок з науковими програмами, планами, темами

Підвищення ефективності, надійності та ресурсу динамічних агрегатів – насосів, компресорів, турбомашин, які функціонують в режимах швидкісного ковзання, перепадів тиску та теплових навантажень, залишається одним з пріоритетних напрямів сучасного машинобудування. Їхню надійну, ефективну та безаварійну роботу обумовлює якісне трибологічне забезпечення вузлів ущільнень і опор роторів через неможливість утримати мастильний шар в умовах змінних навантажень, температурних деформацій та динамічних збурень, передчасного зношування та витоків небезпечних середовищ і навіть катастрофічних відмов агрегатів.

В дисертаційній роботі реалізовано комплексний підхід до дослідження процесів тертя та зношування у вузлах герметизації та опорах є визначальним не лише для зменшення енергетичних втрат, але й для забезпечення герметичності, теплового стану та динамічної стійкості роторів. При цьому спостерігається комплексний вплив трибологічних параметрів: коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування, температурно-в'язкісних ефектів і текстурування поверхонь на силові характеристики ущільнень і опор та їх ротородинамічні коефіцієнти.

В зв'язку з цим безумовно актуальним є те, що створення наукових основ трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин на основі комплексного врахування термогідродинамічних, контактно-механічних і ротородинамічних закономірностей в умовах зростаючих вимог до енергетичної ефективності, герметичності та екологічної безпеки машин та обладнання.

Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідних робіт

Сумського державного університету, в яких здобувач був співвиконавцем, виконавцем і науковим керівником держбюджетних і госпдоговірних тем, починаючи з 2000 року по 2025 рік. Номера держреєстрації: 0100U003222; 0103U000771; 0106U001937; 0109U001385; 0111U002151; 0113U000135; 0115U000679; 0117U002249; 0120U102004; 0123U101853; 0108U007133; 0120U104164; 0123U103299; 0121U112684.

Дисертаційні дослідження проводилися в рамках виконання науково-дослідних робіт за спільним українсько-французьким проєктом: «Зниження викидів забруднюючих речовин за допомогою енергоефективних ущільнювальних рішень», українсько-польським проєктом: «Проблеми динаміки та конструювання ущільнювальних вузлів відцентрових машин (насосів, компресорів) в аспекті індустрії 4.0», а також в рамках держбюджетного НДР: «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» де здобувачем розроблені розроблені методики розрахунку торцевих і шпаринних ущільнень відцентрових насосів та розв’язана термогідродинамічна задача газового запірного імпульсного ущільнення.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертація складається складається із вступу, п’яти розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 498 сторінок. Дисертація містить 232 ілюстрації, 31 таблицю, список використаних джерел із 449 найменувань, 7 додатків.

У вступі наведені основні дані щодо актуальності роботи, її наукової новизни і практичної цінності. Визначено мету і задачі дисертаційної роботи, об’єкт, предмет і напрями досліджень, показано особистий внесок здобувача при виконанні роботи.

У першому розділі дано аналіз наукових праць, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням перспективних конструкцій ущільнень та опор відцентрових машин, дозволив виявити низку невирішених науково-технічних проблем. Зокрема обґрунтовується відсутність комплексних досліджень та методики визначення витратних і ротородинамічних характеристик ущільнень-

опор, які використовуються у багатоступневих насосах як вбудовані опорні та упорні підшипники, що працюють на перекачуваному середовищі. Зазначається, що недостатньо досліджено особливості течії рідинно-газових сумішей та вплив об'ємного вмісту газу на вібраційний стан багатофазних насосів.

Акцентується увага на необхідність виявлення причин виникнення статичної та динамічної нестійкості роторів у багатошпаринних ущільненнях, визначення ротородинамічних і витратних характеристик демпферних лункових ущільнень та їх порівняння з характеристиками інших типів шпаринних, лабіринтних і демпферних ущільнювальних систем.

Зазначено також на потребу дослідження гідродинамічних характеристик нових конструкцій торцевих ущільнень із гідродинамічним розвантаженням трибоспряжень для відцентрових насосів та розроблення і експериментальної перевірки газодинамічних торцевих ущільнень і запірних імпульсних ущільнювальних систем для герметизації насосного та компресорного обладнання.

Обґрунтовується актуальність проблеми підвищення несучої здатності упорних підшипників ковзання шляхом покращення їх теплового режиму, дослідження гідродинамічних сил і динаміки сепараторів кріогенних підшипників ковзання, визначення динамічних характеристик запірних зрівноважувальних пристроїв багатоступінчастих відцентрових насосів енергетичного обладнання.

Системний аналіз дозволив сформулювати наукову проблему створення теоретичних основ трибологічного забезпечення процесів герметизації, змащування та забезпечення динамічної стійкості роторних систем відцентрових машин та запропоновано концептуальну схему формування наукової проблематики, яка реалізується в наступних розділах дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблено оригінальне експериментальне обладнання для дослідження запірних торцевих імпульсних ущільнень різних конструкцій, що дозволяє оцінити особливості процесу герметизації, визначити пульсації тиску в робочих камерах та дослідити витратні характеристики залежно від режимних параметрів.

Наведені результати експериментальних досліджень торцевих сальникових

ущільнень із гідродинамічним розвантаженням підтверджують ефективність запропонованих конструкцій. Встановлено, що застосування гідродинамічних канавок у поєднанні з канавками зворотного нагнітання сприяє зменшенню витоків, тертя та зношування, а також підвищують ресурс ущільнення.

Визначено закономірності зміни температурного режиму залежно від тиску мастила та частоти обертання вала в проведених експериментальних дослідженнях упорного гідродинамічного колодкового підшипника ковзання.

Для односідельних і двосідельних регуляторів перепаду тиску отримано статичні та динамічні характеристики, що дозволяє оцінити особливості їх функціонування в різних режимах роботи.

Показано, що експериментальні дослідження трьохшпаринного ущільнення здійснюють суттєвий вплив геометричних параметрів з'єднувальної камери та зазорів на статичну і динамічну стійкість ротора.

У третьому розділі показано, що аналіз динамічних характеристик виявив суттєві переваги «довгої» щілини порівняно з «короткою» при використанні їх як ущільнень-опор. Для «довгої» щілини характерні вищі коефіцієнти жорсткості та демпфування, що забезпечується значним впливом окружного потоку, тоді як у «короткій» щілині переважає осьова течія.

Здобувачем встановлено, що зі збільшенням ексцентриситету зростає коефіцієнт прямої жорсткості ущільнення-опори, тоді як коефіцієнти демпфування та перехресної жорсткості є вищими за малих ексцентриситетів, що пояснюється зміною товщини робочої плівки.

Результати амплітудно-частотних характеристик підтверджують суттєвий вплив коефіцієнтів жорсткості та демпфування ущільнень-опор на динамічну поведінку ротора багатоступеневого відцентрового насоса.

Аналіз двофазної течії у шпаринних ущільненнях виявив складний характер розподілу газових бульбашок у різних напрямках потоку. Обґрунтовано, що для адекватного моделювання таких процесів необхідно враховувати додаткові міжфазні сили та використовувати полідисперсні моделі балансу популяцій, що забезпечують підвищення точності визначення динамічних характеристик.

Методами обчислювальної гідродинаміки досліджено вплив геометричних

параметрів з'єднувальних камер, зазорів, ребер і дифузорів на статичні та динамічні характеристики дво- і трьохшпаринних ущільнень.

Встановлено, що деформація ущільнення та зменшення товщини буртів призводять до зростання абсолютних значень коефіцієнтів жорсткості й демпфування та появи від'ємної прямої жорсткості. Зазначений ефект необхідно враховувати при визначенні критичних частот обертання.

Результати нестационарного CFD-аналізу підтвердили високі динамічні та демпфувальні властивості лункових ущільнень із серпоподібними канавками. Визначено вплив геометрії ущільнення на втрати тертя, розподіл тиску, витоки та динамічні характеристики, що підтверджує перспективність їх застосування у високонавантажених роторних машинах.

У четвертому розділі розроблено методику чисельного моделювання пружно-гідродинамічного змащення торцевих сальникових ущільнень із гідродинамічним розвантаженням. Отримані результати добре узгоджуються з експериментальними даними та дозволяють визначати розподіл контактних тисків у парі тертя. Побудовано числову модель зношування на основі рівняння Арчарда, яка враховує вплив робочого тиску та частоти обертання на інтенсивність зношування захисних втулок.

На основі аналізу нестационарної газової течії в запірних імпульсних ущільненнях, встановлено вплив геометричних параметрів та режимів роботи на пульсації тиску і перепад тисків між ущільнювальним та запірним середовищами, закономірності зміни жорсткості та витоків залежно від величини робочого зазору. Досліджено теплові деформації кілець запірного імпульсного ущільнення показали їх значний вплив на форму та розмір робочого зазору, а також встановлено відсутність критичних деформацій і ризику виникнення хвилястості поверхонь, що може негативно впливати на працездатність вузла. Аналізом динамічних характеристик показано, що зі збільшенням частоти обертання зменшуються коефіцієнти жорсткості та демпфування, тоді як підвищення тиску призводить до їх зростання.

Для торцевих пар зі спіральними канавками виконано числові та експериментальні дослідження, які підтверджують адекватність розрахункових

моделей. Визначено вплив геометрії канавок і величини зазору на силу гідродинамічного розвантаження та коефіцієнт тертя.

У п'ятому розділі показано, що метод малих збурень дозволяє визначати динамічні характеристики шпаринних ущільнень як для моделей «короткої», так і «довгої» щілини, а також оцінювати межі застосовності спрощених розрахункових підходів. Побудовано математичну модель безконтактних газових торцевих ущільнень із модифікованими поверхнями, яка базується на числовому розв'язанні рівняння Рейнольдса та рівнянь руху статора. Встановлено вплив геометрії поверхонь і режимних параметрів на кутові коливання статора, що дає можливість зменшити їх шляхом раціонального вибору конструктивних параметрів.

Запропоновано числову динамічну модель імпульсного газового ущільнення, яка дозволяє оцінювати вплив робочих режимів і геометрії камер на характеристики газової плівки. Встановлено закономірності зміни її товщини залежно від швидкості обертання, глибини камери та тиску робочого середовища. Розроблено методику розрахунку динаміки врівноважувального диска запірної гідропр'яти забезпечує визначення власних частот осьових коливань ротора, меж динамічної стійкості та частотних характеристик системи.

Розроблено аналітичний метод розрахунку регулятора перепаду тиску прямої дії для систем сухих газових ущільнень, що дозволяє забезпечити стабільність роботи та підтримання необхідного перепаду тиску в широкому діапазоні режимів експлуатації компресора. Розроблено методику та програмне забезпечення для автоматизованого аналізу динаміки роторів відцентрових насосів з урахуванням впливу жорсткісних і демпфувальних характеристик ущільнень-опор.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна

Достовірність наукових результатів дисертаційної роботи забезпечується використанням фундаментальних рівнянь механіки рідини і газу, основ трибологічної теорії спряжень деталей в різних режимах функціонування,

усталених математичних методів моделювання та сучасних програмних комплексів – зокрема ANSYS CFX та Fluent. Теоретичне обґрунтування результатів підтверджено порівнянням з даними фізичних експериментів, проведених на спеціалізованих стендах у Сумському державному університеті, а також з результатами незалежних зарубіжних дослідників. Такий підхід свідчить про коректність застосованих і розвинутих моделей нестационарної просторової гідродинамічної складної течії в кільцевих каналах короткого і довгого шпаринних ущільнень-опор при циліндричній прецесії вала; моделі багатозфазної гідродинаміки, моделю інтегральних характеристик потоку та ін.

До найбільш вагомих нових наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі можливо віднести наступні.

Розвинуто нестационарну тривимірну модель гідродинамічної течії в кільцевих каналах шпаринних ущільнень-опор, яка охоплює режими циліндричної прецесії вала при переважаючій осевій та окружній течіях, і на її основі встановлено умови переходу до спіралеподібної структури потоку, здатної ініціювати динамічну нестійкість ротора.

Вирішено задачу двофазної бульбашкової течії в шпаринному ущільненні з використанням полідисперсної ейлер-ейлерової моделі з урахуванням підйомної сили та турбулентного розсіювання, що дозволило встановити кількісні залежності між газовістом та гідродинамічними силами, коефіцієнтами жорсткості й демпфування.

Виконано систематичне розрахунково-експериментальне дослідження двох- та трьохшпаринних ущільнень, визначено механізм тангенціального силового впливу на ротор та доведено ефективність конструктивних заходів (радіальні ребра, збільшена камера, дифузорна конусність) для підвищення стабілізуючих властивостей ущільнень.

Подальшого розвитку набули методи розрахунку термогідродинамічної задачі для упорного підшипника ковзання зі скребками та охолодженням термонавантаженої зони, а також задачі гідродинамічного змащення кріогенного кулькового підшипника, що дозволило визначити розподіл тисків, гідродинамічних сил і момент тертя з верифікацією за наявними

експериментальними даними.

Розроблено аналітичний метод розрахунку характеристик газового регулятора перепаду тиску прямої дії для систем сухих газових ущільнень, що дозволяє забезпечити стійкий режим роботи в усьому діапазоні навантажень компресора та відбудовуватись від можливих режимів динамічної нестійкості.

Практичне значення одержаних результатів

Дисертаційна робота має виражену прикладну спрямованість: розроблені перспективні конструкції і створені методики числового та аналітичного розрахунків трибологічних, витратних і стійкісних характеристик ущільнень та опор відцентрових машин. Деякі з них реалізовані у вигляді програмних додатків до програмного комплексу ANSYS. Результати роботи впроваджені на ряді провідних підприємствах машинобудівної галузі України: АТ «СМНВО-Інжиніринг», АТ «ВНДІАЕН», ПАТ «Азот», «ТРІЗ» ЛТД ТОВ. Розроблені методики статичного та динамічного розрахунків запірних торцевих імпульсних ущільнень, методика розрахунку запірних пристроїв осьового врівноваження і багатошпаринних ущільнень при проектуванні відцентрових насосів, методики та програмні модулі для числового розрахунку характеристик ущільнень і динаміки ротора.

Прикладне значення роботи підтверджено і результатами міжнародного наукового співробітництва – розроблені методики використовувались під час наукового стажування здобувача у Корейському інституті науки і технологій та у спільних дослідженнях з французькими науковими установами (Університет Пуатьє – ПЕ, PPrime Institut). Отримано премію Кабінету Міністрів України 2021 року за розроблення і впровадження інноваційних технологій відповідальних вузлів роторних машин.

Частину результатів реалізовано у вигляді програмних додатків до ANSYS, а також захищено патентами та авторськими свідоцтвами. Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі Сумського державного університету при викладанні дисциплін з обчислювальної гідроаеромеханіки та трибомеханіки.

Повнота викладення основних результатів дисертації у опублікованих наукових роботах

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 87 наукових праць, з них 2 публікації у розділі монографії; 17 статей у фахових спеціалізованих виданнях; 15 статей у фахових виданнях, що внесені до наукометричних баз даних SCOPUS та/або WoS (з них 6 статей у виданнях, що входять до кuartилів Q1 журналу Tribology International та Mechanical Systems and Signal Processing); статті у фахових українських та іноземних спеціалізованих виданнях; матеріали доповідей на авторитетних міжнародних конференціях у Великій Британії, Німеччині, Франції, Польщі, Республіці Корея.

Зазначена кількість і якість публікацій повністю задовольняють вимоги, що висуваються МОН України до докторських дисертацій. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації. Представлені публікації дозволяють вважати, що наукові положення та висновки дисертаційної роботи достатньо повно висвітлені у відкритих наукових виданнях.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю за доцільне висловити ряд зауважень і запитань, які можуть бути предметом наукової дискусії.

1. У дисертаційній роботі значна частина теоретичних і числових результатів верифікується з використанням даних, отриманих на стендах самого автора або його колег. Доцільно було б більш докладно порівняти ключові результати з незалежними даними інших наукових шкіл, зокрема із загальновизнаними бенчмарками ротородинаміки ущільнень (Техаський університет A&M, NASA, дані конференції Turbomachinery Symposium).

2. Для «довгих» шпаринних ущільнень-опор в роботі показано формування спіралеподібної структури потоку при переважанні окружної складової швидкості над осьовою. В той час недостатньо визначено критичне співвідношення цих швидкостей, при якому виникає дана нестійкість. При цьому для практичного застосування бажано було б ввести відповідний безрозмірний критерій.

3. При дослідженні двофазної бульбашкової течії прийнята однорідна ейлер-ейлерова модель. Однак у роботі слід було проаналізувати межі застосовності цієї моделі у порівнянні з моделями типу Euler–Lagrange за умов великого газовмісту (понад 15%), що є актуальним у кавітаційних умовах роботи ущільнень.

4. При дослідженні торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням трибоспрямижень деталей недостатньо розкрито питання впливу зношування набивки в часі на зміну режиму змащення. Є необхідність врахування впливу зношування набивки в часі на зміну режиму змащення. Зазначимо, що такі довгострокові ефекти мають принципове значення для оцінки ресурсу ущільнення в реальних умовах експлуатації.

5. Застосовуючи метод планування експерименту для побудови регресійних моделей, необхідно вказати рівень значущості та довірчі інтервали, при визначенні необхідних коефіцієнтів регресії.

6. Аналіз коротких щілин реалізовано методом малих збурень, використовуючи спрощене рівняння течії. При цьому бажано було б навести оцінку похибки таких спрощень у порівнянні з повними тривимірними розрахунками CFD для конкретних геометрій, що розглядаються.

7. Порівняльний аналіз динамічних характеристик безконтактних газових торцевих ущільнень за різними типами модифікацій поверхонь, таких як конусність, спіральні канавки, хвилястість, радіальні канавки, бажано проводити, використовуючи узагальнений критерій вибору оптимального типу модифікації, а також залежність від робочих параметрів тиску, температури, швидкості обертання.

8. Робота є оригінальною і значною за обсягом та охопленням широкого спектру задач. У зв'язку з цим необхідно більш чітко виокремити внесок здобувача в розвиток наукової школи В.А. Марцинковського.

9. При дослідженні торцевих імпульсних ущільнень та підшипників кочення доцільно було б врахувати вплив пружних деформацій робочих поверхонь на характеристики мастильного шару та розглянути розв'язання задач еластогідродинамічного мащення, аналогічно до підходів, застосованих здобувачем для деформованих плаваючих і торцевих сальникових ущільнень з податливим дном.

Загальний висновок по роботі

Дисертаційна робота Загорулька Андрія Васильовича «Наукові основи трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин» є завершеною науковою працею, яка вирішує важливу науково-технічну проблему – створення науково обґрунтованих методів розрахунку і проєктування ущільнень та опор роторів відцентрових машин, що забезпечують стійкі режими гідро-газодинамічного змащення при мінімальних витратах, знижених витратах на тертя та обмеженому зношуванні.

Дисертаційна робота Загорулька А.В. відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах, не містить академічного плагіату та задовольняє вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з пунктами 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року за № 1197, а її автор, Загорулько Андрій Васильович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент:

професор кафедри

експлуатації та ремонту машин

Центральноукраїнського національного

технічного університету,

доктор технічних наук, професор



Віктор АУЛІН

Підпис проф. Ауліна В.В. засвідчую,

проректор з наукової роботи та

міжнародних зв'язків



Андрій ТИХИЙ