

## ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора **Мікосянчик Оксани Олександрівни**,  
завідувача кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного  
університету «Київський авіаційний інститут»,

на дисертаційну роботу **Загорулька Андрія Васильовича** на тему «**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 (галузь знань – 13 Механічна інженерія).

Дисертаційна робота Загорулька А.В. є науково-дослідною роботою, яка представлена у вигляді рукопису та містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список літературних джерел із 449 найменувань та додатків на 11 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 498 сторінок, дисертаційна робота містить 232 ілюстрації, 31 таблицю.

### **Актуальність обраної теми досліджень та зв'язок її з науковими програмами**

Вирішення проблеми підвищення надійності, герметичності та енергоефективності відцентрових турбомашин (насосів, компресорів, турбін) в хімічній, нафтогазовій, енергетичній та інших галузях промисловості потребує системних досліджень, підпорядкованих меті підвищення працездатності та вібронадійності трибовузлів роторних систем.

Одним із найактуальніших напрямків сучасної механічної інженерії є трибологічне забезпечення стабільних експлуатаційних характеристик динамічного обладнання за рахунок застосування вискоефективних безконтактних ущільнювальних вузлів. Шпаринні та торцеві ущільнення є основними елементами проточної частини відцентрових машин, які безпосередньо визначають їх об'ємний ККД та динамічну стійкість. Проте робота традиційних циліндричних шпарин в умовах високих обертових швидкостей та значних перепадів тиску обмежена через виникнення спіралеподібних течій рідини, що загрожує втратою динамічної стійкості ротора й прецесією вала. Модернізація геометричного профілю робочих поверхонь ущільнень, зокрема використання багатошпаринних, лункових демпферних чи імпульсних торцевих систем, може значно підвищити жорсткісні та демпфуючі властивості мастильного шару. Це сприятиме суттєвому розширенню галузі безпечного застосування високообертових турбомашин.

Забезпечення вібронадійності машин при перекачуванні багатофазних середовищ, за умов газоподібного буферного захисту або використання кріогенного мащення є важливою задачею для сучасного високотехнологічного

виробництва. Деградацію та коливання статорних кілець і валів у пускових та усталених режимах можна знизити за допомогою науково обґрунтованого вибору параметрів ущільнень-опор. Ущільнення-опори є надзвичайно перспективними вузлами завдяки їх здатності одночасно виконувати функції безконтактного ущільнювача та нероз'ємного гідродинамічного підшипника ковзання. Таким чином, актуальним є створення наукових основ трибологічного проектування нових безконтактних систем герметизації з керованим комплексом витратних і ротородинамічних характеристик.

Аналіз існуючих моделей гідродинаміки течії в мастильному шарі одношпаринних кільцевих ущільнень-опор показує, що тривалий час розрахунок таких елементів базувався на значних спрощеннях, які не повною мірою враховували реальні просторові ефекти. Традиційні підходи зазвичай спиралися на теорію «коротких» шпарин, яка є зручною для інженерних розрахунків витоків, але виявляється неточною при визначенні динамічних коефіцієнтів жорсткості, демпфування та приєднаної маси в ущільненнях із більшим співвідношенням довжини до діаметра. Ігнорування нестационарного характеру просторової течії в кільцевому каналі за умов прецесійного руху вала призводить до серйозних похибок під час прогнозування меж динамічної стійкості високооберткових роторів. Крім того, класичні математичні моделі практично не враховували вплив вхідної закрутки потоку на тангенціальні гідродинамічні сили, які ініціюють автоколивання системи.

З огляду на це, актуальним є дослідження фізики течії рідини в мікрозазорах з урахуванням нестационарних просторових факторів для побудови уточнених математичних моделей і розробки методик інженерного проектування нових вузлів герметизації.

Дисертаційна робота виконана в рамках наукових програм та планів Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України. Автор був співвиконавцем, відповідальним виконавцем і науковим керівником 15 держбюджетних і госпдоговірних тем. Матеріали досліджень, що стосуються визначення меж гідродинамічної стійкості високооберткових роторних систем та оптимізації геометрії мікрозазорів, увійшли до звітів за держбюджетними темами. Результати проведених теоретичних та експериментальних розробок, покладені в основу уточнених інженерних методик розрахунку статичних і динамічних характеристик ущільнювальних вузлів, які впроваджені у практику проектування, виробництва та модернізації вітчизняного насосно-компресорного обладнання.

### **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені дані щодо апробації результатів.

У **першому розділі** проведений аналіз науково-технічної літератури за темою дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність та визначені основні напрямки досліджень щодо трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин.

На основі аналізу теоретичних та прикладних розробок встановлено, що безконтактні шпаринні ущільнення, які поєднують функції ущільнювальних вузлів і додаткових гідродинамічних опор, мають відповідати наступним вимогам: забезпечувати високу трибологічну надійність елементів, мати раціональне співвідношення геометричних параметрів для формування центруючих сил, характеризуватися мінімальним рівнем тангенціальних зусиль мастильного шару в усьому діапазоні робочих частот обертання вала.

Розглянуто перспективи застосування спеціальних засобів і конструктивних модифікацій поверхонь, які володіють підвищеною демпфуючою здатністю та стійкістю до зношування й вібраційного навантаження, зокрема текстурованих (лункових) демпферів, багатошпаринних затворів та комбінованих імпульсних торцевих систем для зниження об'ємних витоків і попередження прецесії ротора.

Визначено мету роботи і напрямки теоретичних і експериментальних досліджень: із залученням сучасних математичних методів механіки суцільних середовищ розробити наукові основи проектування високоефективних безконтактних ущільнень-опор, оцінити вплив макрошорсткості та конфігурації зазорів на інерційні коефіцієнти потоку, експериментально дослідити гідродинамічні характеристики модельних вузлів та розробити практичні рекомендації по їх застосуванню для підвищення ресурсу турбомашин.

**У другому розділі** наведено результати експериментальних досліджень гідродинамічних та динамічних характеристик високоефективних ущільнювальних систем та упорних підшипників ковзання. На основі проведених стендових випробувань визначено, що експериментальні установки та методики тестування ущільнювальних вузлів мають відповідати наступним вимогам: забезпечувати можливість моделювання режимів як із нерухомим, так і з обертовим валом, дозволяти надійно фіксувати радіальні та тангенціальні сили мастильного шару в зазорі, характеризуватися високою точністю вимірювання об'ємних витоків і теплового стану трибоспряжень у широкому діапазоні робочих параметрів.

Розглянуто перспективи застосування нових конструктивних рішень для підвищення ефективності трибовузлів відцентрових машин, зокрема запірних торцевих імпульсних ущільнень із буферними канавками, дискретним та неперервним підведенням середовища, торцевих сальникових ущільнень із гідродинамічним розвантаженням пари тертя, а також дво- та трьохшпаринних затворів зі з'єднувальними камерами різної геометрії для обмеження коливань ротора.

Визначено завдання експериментального етапу досліджень: провести комплексні випробування запірних імпульсних ущільнень відцентрових компресорів, встановити фізико-механічні властивості та профіль шорсткості поверхні сальникових набивок, проаналізувати зміну теплового стану упорного підшипника ковзання під навантаженням, а також виконати порівняльний аналіз витоків і силових факторів у багатошпаринних ущільнювальних системах для верифікації розрахункових моделей

**У третьому розділі** представлено розробку та наведено верифікацію уточненого методу числового розрахунку складної просторової течії в

кільцевому зазорі «короткого» та «довгого» шпаринних ущільнень турбомашин. У ході досліджень було детально проаналізовано лінеаризовані ротородинамічні коефіцієнти мастильного шару, зокрема пряму й перехресну жорсткість, демпфування та приєднану масу. Встановлено важливу фізичну закономірність: за умови великого ексцентриситету коефіцієнт прямої жорсткості значно переважає його значення при малому ексцентриситеті. Натомість при невеликих зміщеннях вала більш вираженими стають саме демпфуючі властивості плівки, що безпосередньо обумовлено зміною її локальної товщини. Важливим аспектом аналізу став вплив закрутки потоку на вході в ущільнення – встановлено суттєву відмінність між динамічними коефіцієнтами за різної її відносної величини. Це важливо для виконання точних інженерних розрахунків динаміки ротора як на пускових режимах, так і під час усталеної роботи агрегату.

Представлено моделювання двофазних течій, у межах якого вперше виконано комплексні розрахункові дослідження складного просторового характеру бульбашкового рідинно-газового потоку в зазорі з урахуванням циліндричної прецесії вала та нестационарної деформації сітки. Завдяки застосуванню методів обчислювальної гідродинаміки визначено залежності масових витоків, втрат потужності на рідинне тертя та результуючих динамічних сил від об'ємної долі газу на вході. Висока достовірність розроблених обчислювальних гідродинамічних моделей підтверджується їхнім успішним зіставленням із класичними моделями інтегральних характеристик потоку та експериментальними даними.

Значна частина розділу присвячена стаціонарному та нестационарному аналізу багатошпаринних систем, де досліджувалися двох- і трьохшпаринні ущільнення за радіальних зміщень вала від 0,04 до 0,16 мм. Доведено визначальний вплив геометричних розмірів з'єднувальної камери та зазору другої шпарини на перерозподіл швидкостей течії та підсумкову величину гідростатичних і тангенціальних сил. У роботі оцінено вплив коефіцієнта тертя, а також конструктивних роторних і статорних ребер у камерах, які забезпечують ефективне гальмування окружного потоку і сприяють суттєвому підвищенню загальної динамічної стійкості валу.

При аналізі деформівних і лункових конструкцій автором досліджено трибодинамічну поведінку деформованого плаваючого ущільнення. Виявлено ефект виникнення негативної прямої жорсткості, що обумовлено стрімким зростанням сумарної швидкості руху рідини в зоні мінімального зазору. Разом із цим, за допомогою методів планування експерименту виконано параметричний аналіз лункового демпферного ущільнення. Дослідження підтвердили, що використання серповидних лунок створює перешкоди окружному потоку робочого середовища, ефективно знижує циркуляційні сили, мінімізує об'ємні витoki та забезпечує високі демпферні властивості всієї системи.

Отримані числові закономірності та верифіковані моделі дають змогу цілеспрямовано й ефективно керувати жорсткісними та демпфувальними характеристиками мастильного шару, запобігаючи виникненню небезпечної статичної та динамічної нестійкості роторів сучасних турбомашин.

У четвертому розділі представлено числові дослідження гідродинамічних, теплових та деформаційних процесів у торцевих ущільненнях та підшипниках відцентрових машин з використанням програмного комплексу ANSYS Workbench. Розрахунки базуються на сумісному розв'язанні рівнянь гідрогазодинаміки та теорії пружності за технологією взаємодії рідини та конструкції через ітераційне поєднання модулів ANSYS Mechanical та ANSYS CFX. Для точного математичного опису течії в тонких мастильних шарах трибоспрямижень застосовано диференціальне рівняння Рейнольдса для ламінарного та квазістаціонарного режимів руху в'язкої рідини, що дало змогу ефективно розрахувати гідродинамічний тиск у зонах мінімальних зазорів. Водночас для моделювання складних тривимірних течій, кріогенних середовищ та високошвидкісних потоків газу з урахуванням конвективних складових прискорення та турбулентності задіяно повну систему тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса, осереднених за Рейнольдсом. На основі цього комбінованого підходу реалізовано метод розв'язання задачі пружногідродинамічного змащення торцевих сальникових ущільнень із гідродинамічним розвантаженням пари тертя для двох геометричних конфігурацій статора: з трапецієподібними пазами на дні обойми під сальниковою набивкою та з реверсивними канавками на опорному кільці. Врахування пружнопластичних деформацій та мікрогеометрії набивки дозволило встановити закономірності зміни зазору, контактної й гідродинамічної тисків, а також довести зниження коефіцієнта тертя на 67,44% та зменшення обсягу витоків до 0,1 л/год. Оцінювання зношування втулки валу виконано за допомогою числової моделі контакту з тертям на основі видозміненого рівняння Арчарда. Встановлено лінійне зростання інтенсивності зношування від лінійної швидкості ковзання та нелінійне – від робочого тиску середовища, що дозволяє прогнозувати термін служби захисних елементів.

Проведено термогідродинамічне моделювання та оптимізацію теплового стану упорних колодкових підшипників ковзання. Шляхом спільного розв'язання рівняння Рейнольдса для визначення полів тиску, рівняння конвективного теплообміну та теплопровідності в елементах конструкції визначено локальні температури у змащувальному шарі. Зіставлення розрахункових даних із експериментальними показало задовільний збіг із максимальним відхиленням середньої температури колодок не більше 5,8%. Впровадження модернізованої конструкції підшипника з маслоз'ємними скребками та охолоджувальними отворами в тілі колодок забезпечує ефективне відведення гарячої плівки з вихідної кромки, запобігаючи перегріву на вході в наступний сектор. Це дозволяє зменшити зазор у точці опори з 42 до 22 мкм і збільшити сумарну осьову несучу здатність вузла у 2,25–2,44 рази при аналогічних температурних режимах. Крім того, у розділі на основі тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса розв'язано задачу турбулентної течії кріогенного середовища в обертовій області кулькового підшипника кочення з урахуванням кругової прецесії сепаратора. Визначено просторовий розподіл масової частки фаз, тиску, швидкостей і вихрових зон, а також розраховано радіальні й тангенціальні сили взаємодії між елементами підшипника в умовах гідродинамічного змащення.

Представлено розв'язання нестационарної термогазодинамічної задачі течії стисливого газу (повітря як ідеального газу) в запірних торцевих імпульсних ущільненнях із неперервним і дискретним підведенням через інтерфейс «ротор-статор» на базі чисельного інтегрування рівнянь Нав'є–Стокса. Описано принцип роботи ущільнення як системи автоматичного регулювання зазору, де усереднений тиск у камерах і розкриваюча сила динамічно змінюються в залежності від зміни торцевого зазору. Аналіз осцилограм тиску виявив, що амплітуда пульсацій у камерах суттєво зростає при збільшенні запірного тиску та зменшенні глибини камер від 2 до 0,3 мм. За допомогою нестационарного теплового аналізу оцінено конвективне охолодження деталей за рахунок радіальної течії газу та розширення середовища в камерах. Додатково проведено числове дослідження односідельного регулятора перепаду тиску «газ-газ» із конфузорними каналами та демпферною камерою, яке підтвердило усунення небезпечних режимів самозбудження золотника та автоколивань рухомої частини.

У **п'ятому розділі** розроблені числові моделі аналізу гідродинамічних характеристик рідинних шпаринних і торцевих газових ущільнень, а також викладені відповідні методики інженерного розрахунку. Розглядається двовимірна задача течії рідини в гладкій шпарині з урахуванням прецесійного руху ротора та його ексцентриситету. Для опису руху в'язкої рідини використано рівняння Нав'є–Стокса, усереднені за Рейнольдсом, які згодом інтегруються по зазору разом із рівнянням нерозривності потоку. Проведені в пакеті Maple чисельні розрахунки виявили обмеженість методу Ньютона через накопичення похибок при значній довжині щілин. Як альтернативу впроваджено метод малих збуджень, що забезпечує високу точність та дозволяє встановити межі застосовності спрощених моделей «короткої» та «довгої» щілини для визначення лінеаризованих коефіцієнтів жорсткості, демпфування та приєднаної маси.

Окрему увагу приділено параметричному й динамічному аналізу безконтактних газових торцевих ущільнень типу FMS із гнучко встановленим статором. Математична модель базується на розв'язанні методом скінченних об'ємів нелінійного рівняння Рейнольдса, що описує розподіл тиску в зазорі товщиною в кілька мікрометрів, та системи диференціальних рівнянь руху статора. Досліджено чотири конфігурації поверхонь: конусну, хвилясту, зі спіральною та радіальною канавками. Встановлено, що підвищення кутової швидкості спричиняє кутові коливання та перекошення кілець, при цьому найменшу чутливість до вібрацій демонструє саме спіральна канавка, тоді як на гладких поверхнях виникає пряме співударяння деталей. Представлено числове моделювання імпульсних газових ущільнень у нестационарних умовах, де рівняння Рейнольдса розв'язується методом скінченних елементів у поєднанні із законом Ньютона для опису осового переміщення статора. Запропоновано аналітичну залежність на основі безрозмірного робочого параметра ( $G$ ), яка дозволяє масштабувати середню товщину газової плівки, витоки та момент тертя через зміну об'єму камер.

Представлено дослідження динаміки врівноважуючого диска запірної гідропр'яти, яка розглядається як система автоматичного регулювання з

негативним зворотним зв'язком. Методика дозволяє розраховувати власні частоти осьових коливань ротора та визначати межі його динамічної стійкості. Аналогічний підхід застосовано для оцінювання пружинних регуляторів перепаду тиску (РПТ) прямої дії в системах сухих газових ущільнень. На основі рівнянь балансу масових витрат для адіабатного процесу розширення газу та рівнянь осьової рівноваги золотника отримано аналітичні вирази для статичних, витратних і перехідних характеристик односідельних та двосідельних РПТ. Доведено, що інтеграція демпферної камери в односідельну конструкцію стабілізує систему й усуває автоколивання.

Представлено інженерну методику та спеціалізований програмний додаток для автоматизованого розрахунку динаміки ротора відцентрових насосів у середовищі ANSYS Workbench (із залученням модулів ANSYS CFX та Mechanical), що враховує розраховані ротородинамічні характеристики ущільнень-опор.

**Висновки** дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі одержаних результатів. Вони наведені в кінці підрозділів, розділів 1-5 і в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

### **Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна**

Висунуті у дисертаційній роботі наукові положення, отримані висновки та рекомендації у достатній мірі обґрунтовані. Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень підтверджуються великим обсягом розрахункових та експериментальних даних, отриманих з використанням комплексу сучасних числових методів скінченних об'ємів і скінченних елементів на базі рівнянь Нав'є–Стокса та Рейнольдса. Математичне моделювання гідродинамічних, термодинамічних та контактних процесів реалізовано у програмних комплексах ANSYS і Maple.

Експериментальні результати отримані шляхом планування і проведення лабораторних та стендових випробувань на основі теорії моделювання та методів планування експерименту. Натурні дослідження на спеціалізованих стендах дозволили отримати реальні витратні, температурні та ротородинамічні характеристики розроблених вузлів. Результати числових розрахунків демонструють задовільний якісний та кількісний збіг із даними експериментів, а створені інженерні методики були верифіковані під час промислових випробувань та були впроваджені у практику проектування провідних машинобудівних підприємств галузі.

До найбільш вагомих наукових результатів, отриманих дисертантом, можна віднести наступні:

- удосконалено закономірності формування сил і стійкості у шпаринних ущільненнях різної довжини при прецесійному русі ротора, що дозволяє чітко визначати умови переходу потоку у спіралеподібний режим;
- визначено трибологічні особливості бульбашкового потоку в мастильній плівці з урахуванням міжфазної взаємодії, підйомних та інерційних сил, які безпосередньо впливають на динамічні коефіцієнти ущільнення-опори;

- вперше виявлено вплив коефіцієнта тертя в тангенціальному напрямку та місцевих втрат на характер течії, величину витоків і гідродинамічні сили у дво-, трьохшпаринних та демпферних лункових ущільненнях;
- проведено обґрунтування динамічної стійкості вала у плаваючих та двохшпаринних ущільненнях при повноплівковому гідростатичному змащенні, попри дифузорну форму зазору та виникнення негативної прямої жорсткості;
- вперше встановлено взаємозв'язок параметрів регулювання та меж динамічної стійкості регулятора перепаду тиску сухих газових ущільнень із геометрією вхідного дроселя та демпферної камери;
- уточнено закономірності термогідродинамічного змащення упорних підшипників, що довело ефективність використання маслороз'ємних скребків та охолодження колодок для запобігання температурній деградації мастильного матеріалу;
- вперше визначено гідродинамічний ефект у торцевих сальникових ущільненнях із податливим дном, де спеціальні канавки спричиняють локальну деформацію набивки та знижують контактні напруження й знос;
- удосконалено моделі гідродинамічного режиму мащення кріогенних підшипників кочення у середовищі рідкого азоту та безконтактних торцевих газових ущільнень із пружно встановленим статором і різними типами модифікації поверхонь.

#### **Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:**

1. Створено комплекс взаємопов'язаних чисельних та аналітичних методів розрахунку трибологічних, витратних, теплових і стійкісних характеристик безконтактних і контактних ущільнювальних вузлів та опор відцентрових машин, частина з яких реалізована у вигляді спеціалізованих програмних додатків та інтегрована до інженерного комплексу ANSYS Workbench.
2. Розроблено та впроваджено в практику проектування відцентрових компресорів СКБ АТ «СМНВО-Інжиніринг» модернізовану односідельну конструкцію регулятора перепаду тиску «газ-газ» із демпферною камерою та дроселем ламінарного потоку, а також інженерну методику оцінювання динамічних коефіцієнтів жорсткості й демпфування міжсекційних лабіринтних і лункових ущільнень ротора компресора високого тиску.
3. Рекомендовано до застосування в АТ «ВНДІАЕН» при конструюванні високонавантажених відцентрових насосів методики та результати чисельного розрахунку коефіцієнтів жорсткості й демпфування вбудованих опорних підшипників багатоступінчастого насоса ЦНС 90-1900, а також аналітичні методи розрахунку радіальних і торцевих сальникових ущільнень із гідродинамічним розвантаженням пари тертя та запірних гідроп'ят живильних насосів парових котлів.
4. Впроваджено у конструкторську практику ТОВ «ТРІЗ» ЛТД методику розв'язання задачі термогідродинамічного змащення упорних восьмиколодкових підшипників ковзання зі скребками та охолодженням термонавантаженої зони, а також інженерний метод розрахунку витратних і



ротородинамічних характеристик безконтактних лункових та лабіринтно-лункових демпферних ущільнень відцентрових компресорів.

5. Запропоновано та обґрунтовано нові наукові концепції безвального карданного магнітного насоса в межах виконання спільного міжнародного науково-дослідного проєкту з Техаським інститутом науки, що спрямований на розробку перспективних герметичних гідромеханічних систем.

6. Результати дисертаційних досліджень використано для створення та впровадження у промислове виробництво відповідальних вузлів роторних машин, що забезпечують екологічну безпеку шкідливих виробництв, за що у складі авторського колективу здобувачу було присуджено премію Кабінету Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій.

7. Розроблені інженерні методики розрахунку характеристик трибосистем, алгоритми та створені спеціалізовані комп'ютерні програми впроваджено у навчальний процес Сумського державного університету при викладанні дисциплін з обчислювальної гідромеханіки, трибомеханіки та комп'ютерного інжинірингу для підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

### **Повнота викладу основних результатів дисертації**

За темою дисертації опубліковано **87** наукових праць, у тому числі **2** публікації у розділі монографії; **17** статей у наукових періодичних виданнях України, що входять до Переліку наукових фахових видань МОН України категорій «А» і «Б»; **15** статей у фахових виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus, Web of Science) (зокрема, у виданнях, віднесених до кuartилів Q1 - 8, Q3 - 6; Q4 - 1); **9** статей у іноземних спеціалізованих виданнях; **3** закордонних патенти на винахід; **3** патенти на корисну модель України; **5** авторських прав на твір. Результати роботи доповідалися і пройшли апробацію на **33** міжнародних конференціях, з них **7** публікацій представлено у матеріалах конференцій, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus, Web of Science). Всі вимоги положення ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Загорулька А. В. повністю відповідає спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах (галузь знань – 13 Механічна інженерія).

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям трибологічного забезпечення стабільних експлуатаційних характеристик динамічного обладнання за рахунок застосування вискоефективних безконтактних ущільнювальних вузлів.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної

роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Загорулька А. В. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Дискусійні положення та зауваження**

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу Загорулька А.В., що виконана на достатньо високому науковому рівні, слід зазначити деякі зауваження, дискусійні питання та побажання:

1. В розділі 2 (стор. 165) зазначається, що «...в новій конструкції торцевого сальникового ущільнення істотно менше коефіцієнти тертя  $f=0,014-0,025$ , величина яких зменшується зі збільшенням ущільнювального тиску і відповідає змішаному режиму тертя». Прошу пояснити на чому заснована відповідність показників коефіцієнту тертя саме цьому режиму мащення.

2. У Розділі 3 (3.1.2) при дослідженні «коротких» та «довгих» шпаринних ущільнень, автором розглядається вплив закрутки потоку на вході, проте в тексті недостатньо чітко обґрунтовано вибір граничних значень відносної закрутки потоку на вході в ущільнення  $u/R\omega = 0,25, 0,5, 0,75$  для розрахунку пускових і перехідних режимів.

3. У Розділі 3 (3.2.1) при моделюванні двофазних газорідинних течій із використанням полідисперсної моделі балансу популяцій MUSIG залишається дискусійним питання щодо вибору початкового діаметра газових бульбашок та інтенсивності їх дроблення/коагуляції в умовах високих зсувних напружень у мікротазорі. Чи зміняться параметри моделі, якщо використати інші газове середовище та мастильний матеріал?

4. У Розділі 3 (3.3.3) у числових дослідженнях трьохшпаринних конструкцій (ThASIC та ThASDC) доцільно було б ширше розкрити вплив ексцентриситету ротора на можливу деформацію профілю швидкостей у з'єднувальних камерах та її зворотний вплив на стабільність центруючої сили Ломакіна.

5. Досліджуючи вплив зсувних напружень через «...тангенціальний коефіцієнт тертя статорної стінки  $f_{s\theta}$ » на підсумкову гідродинамічну силу (стор. 272-273), автор не наводить детальних рекомендацій щодо технологічних методів забезпечення необхідної шорсткості або мікрогеометрії цієї поверхні в реальних промислових умовах.

6. При аналізі деформівних плаваючих ущільнень у межах розв'язання задачі гідропружності (стор. 281-289) бажано було б оцінити тривалу часову стабільність пружних властивостей матеріалу статора під впливом високих температур та пульсацій тиску робочого середовища.

7. Використання методів планування експерименту (DOE) для оптимізації геометрії лункових демпферних ущільнень (розділ 3 (3.6.1)) дозволило отримати оптимальні параметри серповидних лунок, проте поза увагою автора залишилося питання складності та вартості виготовлення такої геометрії на виробництві.

8. У Розділі 4, при розв'язанні контактної задачі для торцевого сальникового ущільнення, не зрозумілим залишається механізм зміни пористості та проникності сальникової набивки під дією нерівномірних контактних напружень уздовж осі втулки. Прошу пояснити.

9. Оцінювання трибодинамічного зношування втулки вала за модифікованим рівнянням Арчарда (розділ 4 (4.2.1)) виконано у припущенні лінійної залежності інтенсивності зносу від швидкості, що може призводити до похибок при значному підвищенні температури в зоні тертя. Чи можна спрогнозувати інтенсивність зношування втулки вала, коли умова «повне відведення тепла протікаючою через ущільнення рідиною» (стор. 341) не виконується? Який домінуючий вид зношування в обраній парі тертя вал-втулка?

10. У підрозділі 4.5, присвяченому ОГД-моделюванню кріогенного кулькового підшипника кочення, автори використовують модель однорідної бінарної суміші (50:50 (стор. 356)), хоча за умов інтенсивного кавітаційного випаровування рідкого азоту доцільніше було б застосувати складніші міжфазні моделі переносу маси.

11. Числове оцінювання односідельного регулятора перепаду тиску «газ-газ» довело усунення автоколивань (розділ 5.5), але автору слід було детальніше окреслити межі запірного тиску, за яких інтегрована демпферна камера все ще ефективно виконує свою функцію.

Наведені зауваження по роботі не зменшують значущості отриманих наукових та практичних результатів дослідження, тому не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Загорулька Андрія Васильовича на тему «Наукові основи трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин» є закінченою науково-дослідною роботою, що містить вирішення важливої науково-технічної проблеми розробки наукових основ та інженерних методів комплексного трибологічного забезпечення герметичності, надійного змащення і підвищення статичної та динамічної стійкості роторів відцентрових турбомашин на базі сучасних технологій комп'ютерного моделювання та натурального експерименту.

Незважаючи на наведені вище зауваження, дисертаційна робота у цілому виконана на високому науковому рівні і є завершеною щодо поставлених завдань. Її нові теоретичні і практичні результати є актуальними, науково обґрунтованими та достовірними. Оформлення, стиль і мова викладення роботи в цілому відповідають встановленим вимогам.

Головні результати дисертаційної роботи опубліковані досить широко і мають національне та міжнародне визнання.

Зміст автореферату відповідає основним положенням і змісту дисертації. Положення і результати, що виносилися дисертантом на захист

кандидатської дисертації не використані у докторській дисертаційній роботі.

У цілому робота відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Загорулько Андрій Васильович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри прикладної  
механіки та інженерії матеріалів  
Національного університету  
«Київський авіаційний інститут»

01.06.2026р.



Оксана МІКОСЯНЧИК

Львівська О. Ярославна  
секретар ВАІ  
Знак Набав