

Спеціалізований вчений раді Д70.052.02
Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри машинобудування та технічного сервісу машин
Українського державного університету залізничного транспорту

Вороніна Сергія Володимировича

на дисертаційну роботу

Загорулько Андрія Васильовича

НАУКОВІ ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ, ЗМАЩЕННЯ ТА СТІЙКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРІВ ВІДЦЕНТРОВИХ МАШИН,

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

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 498 сторінок. Обсяг анотацій складає 35 сторінок. Дисертація містить 232 ілюстрації, 31 таблицю, список використаних джерел із 449 найменувань на 46 сторінках, 7 додатків на 12 сторінках. Обсяг основної частини дисертації без анотацій становить 405 сторінок.

Актуальність обраної теми досліджень та її зв'язок з державними науковими програмами.

Робота сучасних динамічних агрегатів, таких як відцентрові насосні і компресорні машини та турбіни супроводжується значними швидкостями, перепадами тиску робочого тіла та тепловими навантаженнями. В таких умовах критичними для працездатності всього агрегату виявляються ущільнення та ущільнення – опори. Вони повинні мати такі основні параметри, які б забезпечували їх надійне гідродинамічне, газодинамічне, гідростатичне та газостатичне мащення в усьому робочому діапазоні навантажень, від моменту пуску агрегату, протягом його роботи, та в моменти зупинки. Зважаючи на широкий спектр існуючих конструкції ущільнень та опор, специфіку роботи певних динамічних агрегатів, а також різноманітність

робочих середовищ, кожному типу ущільнення притаманні власні вимоги до геометричних параметрів. Однак, поєднувальними вимогами до них є: забезпечення герметизації, надійного мащення та заданих стійкісних характеристик роторів відцентрових машин. Саме ці вимоги формують для трибології об'єднану науково-прикладну проблему, пов'язану із одночасним забезпеченням надійного рідинного або газового мащення ущільнень – опор роторів, надійної герметизації з мінімальними або нульовими витоками робочого тіла та заданими характеристиками стійкості роторів шляхом підвищення прямої жорсткості роторів та демпфуючих властивостей ущільнень.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню вказаної проблеми для декількох типів ущільнень та ущільнень - опор: лабіринтних, багатошпаринних, торцевих та сальникових ущільнень, упорних підшипників ковзання та високошвидкісних підшипників ковзання. Вказана номенклатура елементів охоплює майже всі типи роторних відцентрових машин, тому дослідження їх трибологічних та пов'язаних з ними робочих характеристик є актуальними для багатьох галузей, а саме для: галузевого машинобудування, енергетики, авіаційної та ракетно-космічної техніки; нафто- та газовидобування і транспортування. Це робить дисертаційне дослідження актуальним для промислового, науково-дослідницького та освітнього секторів економіки.

Тематика дисертаційної роботи відповідає Закону України № 3534-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності», який набув чинності з 13.01.2024 р.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до: планів виконання науково-дослідних робіт Сумського державного університету; держбюджетних науково-дослідних робіт за фінансування МОН України; науково-дослідних робіт за спільним українсько-французьким проектом «Зниження викидів забруднюючих речовин за допомогою енергоефективних

ущільнювальних рішень»; госпдоговірних науково-дослідних робіт за фінансування промислових підприємств України. Висока зацікавленість промисловості, бізнесу та освітян України та країн ЄС у впровадженні результатів дисертаційного дослідження також підтверджує його актуальність.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми та напрямків дисертаційного дослідження, стисло проаналізовано сучасний стан досліджуваної проблеми, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено методи їх розв'язання, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію та публікацію результатів роботи, а також інформацію про структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі проведений аналіз попередніх теоретичних і експериментальних досліджень сучасного стану проблеми трибо логічного забезпечення мащення, зносостійкості, надійності, стійкості, герметизації та інших робочих характеристик ущільнень і опор та запірних ущільнювальних систем відцентрових машин.

Аналіз проведено для декількох найбільш відповідальних машин та їх ущільнень - опор, які працюють в широкому діапазоні швидкостей, температури, тиску та з різними за фізико-хімічними властивостями робочими середовищами – рідинами, газами та двофазними системами. Особливу увагу автор приділив сучасним підходам до моделювання гідродинамічного мащення одно- та багатошпаринних ущільнень, впливу цього мащення на статичну і динамічну стійкість ротора, розподілу сил та конструкціям ущільнень відцентрових насосів, методам аналізу течії і динаміки деформованих плаваючих ущільнень, витратним та ротородинамічним характеристикам лабіринтних та демпферних ущільнень, конструкціям та методам розрахунку торцевих ущільнень, методам аналізу гідродинаміки і теплового стану упорних підшипників ковзання,

дослідженням статичних і динамічних характеристик високошвидкісних кулькових підшипників кочення.

На основі проведеного аналізу літературних даних автором сформульовані не вивчені раніше питання та на їх основі запропоновані напрямки, мета та задачі дослідження.

В цілому, розділ має дуже потужний аналітичний огляд досліджень за тематикою дисертації, достатній для обґрунтованого формулювання наукової проблеми, мети та задач дослідження.

Зауваження по першому розділу:

1. Підрозділ 1.5 «Багатофазні відцентрові насоси і компресори в підводних установках» перенасичує розділ 1 та не містить інформації про трибологічні питання вказаних агрегатів.

2. В розділі розглянуто велику кількість ущільнень різного типу та конструкцій, які працюють в різних середовищах та за різних умов. Саме тому, варто було б завершити розділ зведеною таблицею (або схемою), в якій зробити класифікацію ущільнень за видами трибологічних проблем та ступенем їх вирішення на даному етапі. Хоча частково така інформація представлена у додатках Е та Ж.

У другому розділі автор представив розроблене оригінальне експериментальне обладнання для досліджень запірних торцевих імпульсних ущільнень різних конструкцій, яке дозволяє проаналізувати механізм герметизації та перевірити їх працездатність. Запропоновані методики експериментальних досліджень ущільнень та наведені результати пошукових експериментів трибологічних та робочих характеристик торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя, упорного гідродинамічного колодкового підшипника ковзання з отриманням залежності середньої температури колодок від тиску мастила в камері навантаження, двохсідельної і односідельної конструкцій регуляторів перепаду тиску з отриманням статичних і динамічних характеристик,

тріохшпаринного ущільнення з необертовим і обертовим валом з оцінкою статичної і динамічної стійкості вала в цих конструкціях ущільнень.

Результати другого розділу дозволили визначити працездатність запропонованого експериментального обладнання, опрацювати в лабораторних умовах запропоновані методики, встановити попередні трибологічні та стійкісні характеристики досліджуваних ущільнень, які були використані в подальшому дослідженні.

Зауваження по другому розділу:

1. Стор. 140 – не зрозуміло, з яких міркувань обрано 12 камер на поверхні обертового кільця 4. Це стандартна конструкція чи нове рішення?

2. Теж саме стосується конструктивних рішень ущільнень на рис. 2.6 стор. 144., 2.8 стор. 145, 2.11 стор. 148.

3. До рис. 2.21 для наочності краще було б додати графіки для модуля пружності набивки.

4. На стор. 163 та 164 запропонована нова конструкція «торцевого сальника з канавками на опорному металевому диску». Чому саме така конструкція, з яких міркувань?

5. В підрозділі 2.3 не вказано тип / марка мастила та його фізико-хімічні властивості. Тобто, взагалі цей фактор не врахований в експерименті?

6. В підрозділі 2.4 відсутні відомості про процеси тертя рухомих елементів регулятора. Мова йде лише про дослідження робочих параметрів.

У третьому розділі представлені результати дослідження трибологічних та динамічних характеристик шпаринних ущільнень та шпаринних ущільнень - опор методами обчислювальної гідродинаміки, отримані відповідні розрахункові моделі та виконана їх перевірка. Визначено вплив закрутки потоку робочого тіла на динамічні характеристики ущільнення-опори, встановлені закономірності для коефіцієнтів жорсткості та демпфування при різній закрутці потоку на вході в ущільнення для різних ексцентриситетів осі вала та осі втулки. Виконано розрахункові дослідження двофазної течії в шпаринних ущільненнях, встановлено граничні умови для

розрахунку їх параметрів та характеристик. Проаналізовано розподіл гідростатичного тиску по довжині ущільнення в місцях мінімального та максимального зазорів та витоків в залежності від величини радіального зміщення. Досліджено вплив осьового розміру з'єднувальних камер та зазору другої шпарини на розподіл швидкостей по довжині та окружності ущільнення. Отримано вплив коефіцієнту тертя на окружну течію для різних конструкцій трьохшпаринних ущільнень. Проведено порівняння запропонованих конструкцій при різних радіальних і осьових розмірах камери, при якому найбільш ефективною визначена конструкція з проточкою на зовнішньому радіусі корпусу, яка має найбільшу величину радіальної гідростатичної центруючої сили. Проведено аналіз величини витоків запропонованого лункового ущільнення в залежності від його геометричних параметрів за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки, встановлено суттєвий вплив ширини ребер на витoki, що надає змогу оптимізувати запропоновану конструкцію. Визначено динамічні характеристики лункового ущільнення в залежності від геометричних параметрів конструкції. Проведено порівняння розрахункових характеристик лункового ущільнення з наявними в літературі експериментальними даними для гладкого, лабіринтного та демпферного ущільнень.

Зауваження по третьому розділу:

1. Якщо розробляємо узагальнену теорію для «коротких» та «довгих» шпарин, тоді слід встановити обмеження для відношення довжини до діаметра.

2. На стор. 206 вказано «Для аналізу динамічних характеристик «короткої» ($l/d = 0,13$) та «довгої» ($l/d = 3$) щілини...». Чому обрані саме такі значення, адже вище на стор. 201 для «короткої» наведені значення менше 0,5? Тобто, існує широкий діапазон, але обрані конкретні значення.

3. В підрозділі 3.1 математична модель також не враховує шорсткість поверхонь (скоріше за все стінки, що омиваються, прийняті гладкими, та не враховуються пограничні явища). Однак, наведені в таблиці 3.3 значення

товщини мастильного шару від 5 мкм, говорять про можливий суттєвий вплив шорсткості на параметри потоку. Чи враховує цей вплив запропонована теорія?

4. В підрозділі 3.2.1 математична модель не враховує явища кавітації, яке посилюється бульбашками газу у двофазній системі та високим перепадом тиску в ущільненні. Можна стверджувати, що кавітація суттєво збільшує втрати потужності на тертя.

5. Для якого виду мащення розраховані значення коефіцієнтів тертя в підрозділі 3.3.3.6? Які фактори, крім швидкості потоку враховують залежності (3.16) та (3.17)?

6. Теж саме стосується граничних умов для розрахунку тангенціального коефіцієнту тертя в пп. 3.4.4.

7. З яких міркувань (для якого виду мащення) та по яких залежностях розрахований коефіцієнт тертя, наведений на рис. 3.86.

Четвертий розділ присвячений числовому розв'язанню задач гідродинамічного мащення торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя, термогідродинамічного мащення упорного підшипника ковзання, числового розрахунку параметрів та характеристик кріогенного кулькового підшипника, числовому розв'язанню нестационарної термогідродинамічної задачі течії газу в запірному імпульсному ущільненні, числовому аналізу гідродинамічного мащення в торцевій парі зі спіральними канавками, числовому статичному та динамічному розрахунку регулятора перепаду тиску «газ-газ».

Для досліджуваних конструкцій запропоновані математичні моделі розрахунку параметрів та характеристик, які були верифіковані, та підтверджена їх узгодженість з даними експериментальних досліджень. Наприклад, важливим результатом для трибології є результати розрахункового аналізу торцевої пари зі спіральними канавками, порівняння розрахункових даних з експериментальними та побудова кривої Герсі – Штрибека, згідно якої коефіцієнт тертя збільшується зі збільшенням зазору та

глибини канавки, при більшому куті спіральної канавки розділення поверхонь відбувається при більшій частоті обертання.

Зауваження по четвертому розділу:

1. З яких міркувань на стор. 336 прийняті модуль пружності сальникової набивки – 50 МПа, коефіцієнт Пуассона сальникової набивки – 0,4? Адже, в пп. 222 коефіцієнт Пуассона набивки є змінним – від 0,3 до 0,4. Теж саме стосується модуля пружності.

2. Рівняння (4.1) не є модифікованим, а є класичним рівнянням Арчарда, оскільки не враховує температури, виду мащення, стану та мікрогеометрії поверхонь, в'язкості та протизношувальних властивостей мастильного матеріалу.

3. На рисунку 4.8 наведені графіки для швидкості зношування, а не для інтенсивності.

4. Яким чином отримані значення мінімальної товщини мастильного шару, наведені на рис. 4.13? Це розрахункові чи експериментальні дані? Якщо розрахункові, по якій залежності? Якщо експериментальні, яким чином вимірювалась товщина?

5. В підрозділі 4.5 наведені дослідження кріогенного кулькового підшипника за умови гідродинамічного мащення рідким азотом. Яким чином встановлено, що вид мащення буде саме гідродинамічним? Вищі кінематичні пари, тобто точковий контакт, обумовлюють швидше за все граничне мащення, навіть при великих швидкостях, оскільки в'язкість рідкого азоту дуже мала.

У п'ятому розділі розроблені математичні моделі розв'язання двовимірної задачі течії рідини в шпаринному ущільненні, модель газових торцевих ущільнень, яка основана на розв'язанні нелінійного рівняння Рейнольдса та рівняння динаміки коливання статора, числова модель імпульсних газових ущільнень, наведені методики інженерного розрахунку та інтерфейси автоматизованого розрахунку ущільнень. Приведений приклад розрахунку ущільнення-опори відцентрового насоса. Запропоновано метод

розрахунку динаміки запірної гідроп'яти, Розроблено аналітичний метод прогнозування характеристик газового регулятора перепаду тиску прямої дії для системи сухих газових ущільнень, представлено приклади розроблення програмних модулів і додатків до програмного комплексу ANSYS для розрахунку динаміки ротора з урахуванням ущільнень-опор.

Зауваження по п'ятому розділу:

1. При вирішенні задачі в підрозділі 5.1 температура та в'язкість залишаються постійними. З яких міркувань уведено таке обмеження? Адже, експлуатаційні умови та в'язкість оливи визначають дуже суттєво гідродинамічні характеристики шпаринних ущільнень.

2. Запропонована методика числового розрахунку трибологічних характеристик торцевого імпульсного газового ущільнення не враховує шорсткості поверхонь тертя, які впливають на витoki рідині та трибологічні характеристики контакту.

У **додатках** наведені акти впровадження в практику розрахунків і проектування промислових підприємств України; сертифікати стажувань і участі у семінарах в зарубіжних установах; схеми та пояснення щодо формулювання наукової проблеми дисертаційного дослідження.

Загальні зауваження по роботі та автореферату:

1. Терміни «змащування», «вид змащування», «вид тертя» часто вживаються не у відповідності до ДСТУ 2823-94. Хоча цей стандарт втратив чинність 01.01.2026 р., однак терміни «мащення» та «змащування» є загальноприйнятими та мають принципово різне значення. Правильно було б вживати терміни «граничне мащення», «змішане мащення», «рідинне мащення», «гідродинамічне мащення», «гідростатичне мащення» тощо. Тобто замість «змащення» вживати «мащення».

2. Робота вирішує поставлені задачі лише для конструктивів ущільнень з нульовим напрацюванням. Фактор напрацювання та зміни протягом нього експлуатаційних умов, впливу зношування на показники ефективності ущільнень, впливу деградації мастильного матеріалу не розглянуто.

3. У рефераті не пояснюється, що жорсткісні і демпфуючі властивості мастильного шару в шпаринних ущільненнях-опорах мають свої особливості, які пов'язані з характером напірної і окружної течій при прецесійному обертанні валу та формуванням сил реакції рідини в вузькому зазорі. Хоча частково інформація з цього приводу присутня на рисунку 1.

4. У рефераті не розкривається сутність коефіцієнту тертя стінки $f_{s\theta}$, хоча і зазначається його вплив на окружну течію.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність.

Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки і рекомендації у достатній мірі обґрунтовані. Достовірність теоретичних положень дисертації ґрунтується на застосуванні фундаментальних положень трибології, гідрогазодинаміки, механіки деформованого твердого тіла та контактної взаємодії. Експериментальні дослідження виконувались на основі числових методів планування експерименту для встановлення залежностей між трибологічними, витратними та ротородинамічними характеристиками і геометрією вузлів ущільнень та опор, числових методів багатопараметричної оптимізації для підвищення несучої здатності, герметичності і динамічної стійкості ущільнень-опор. Методи експериментальних досліджень для перевірки ефективності роботи та визначення трибологічних, витратних, температурних та ротородинамічних характеристик запірних торцевих імпульсних, багатошпаринних ущільнень-опор та упорних підшипників ковзання, торцевих сальникових ущільнень та регуляторів перепаду тиску «газ-газ». Методи гідро- та газодинаміки, теорії коливань та теорії автоматичного регулювання для аналізу статичних і динамічних характеристик запірного врівноважуючого пристрою, торцевих імпульсних ущільнень та ущільнень-опор відцентрових машин.

Загальні висновки по роботі розкривають повноту вирішення поставлених задач дослідження та відбивають всі головні отримані результати роботи, є обґрунтованими та достовірними.

Найбільш вагомими новими науковими результатами, що мають світове і загальнонаціональне значення, отриманими здобувачем, є:

1. Удосконалені закономірності формування гідростатичних і гідродинамічних сил, моментів, коефіцієнтів жорсткості та демпфування у шпаринних ущільненнях різної довжини при прецесійному русі ротора.

2. Удосконалені фізичні основи трибологічних властивостей складноструктурованого бульбашкового потоку в мастильній плівці з урахуванням міжфазної взаємодії, що впливає на ефективну в'язкість і втрати енергії на внутрішнє тертя та дії не лише в'язкого опору, а й інерційних та підйомних сил на динамічні коефіцієнти жорсткості і демпфування двохфазного шпаринного ущільнення-опори.

3. Вперше виявленому впливі тангенціального коефіцієнта тертя, а також вхідних і вихідних місцевих втрат і втрат на тертя по довжині статорної і роторної поверхонь на характер течії мастильного шару та величину витоків, радіальних і тангенціальних гідродинамічних сил у дво- і трьохшпаринних та демпферних лункових ущільненнях.

4. Встановленому вперше істотному впливу геометричних параметрів вхідного в'язкісного дроселя та демпферної камери на точність регулювання робочого перепаду тиску і межі динамічної стійкості рухомої частини регулятора перепаду тиску прямої дії системи сухих газових ущільнень за умов газостатичного мащення.

5. Встановлені закономірності впливу режимних і конструктивних параметрів на формування розподілів гідростатичного тиску і температури, розкриваючої сили, моменту в'язкого тертя, статичної та динамічної жорсткості і демпфування змащувальної плівки, витоків, силових і температурних деформацій кілець на підтримання величини і форми зазору та відсутність зношування кілець торцевих імпульсних ущільнень при гідростатичному мащенні.

6. Розкриття механізму охолодження мастильного шару та відведення частини нагрітого потоку скребками із термонавантаженої зони колодки, що

дозволяє зменшити мінімальний зазор і підвищити несучу здатність упорного підшипника ковзання за рахунок зниження температурно-в'язкісної деградації мастила в умовах гідродинамічного мащення.

7. Закономірності формування гідродинамічного ефекту у торцевому сальниковому ущільненні з податливим дном, зумовленого наявністю пазів і канавок, що викликають локальну деформацію набивки та утворення клиноподібного зазору.

8. Визначення впливу гідродинамічного мащення на формування гідродинамічних сил, які діють на прецесуючий сепаратор, а також на момент в'язкого тертя між обертовими кульками та внутрішньою обертовою та зовнішньою нерухомою доріжками кріогенного підшипника кочення при змащуванні рідким азотом.

9. Визначення трибологічних характеристик торцевої пари з модифікованими поверхнями та закономірності формування динамічної стійкості безконтактних газових торцевих ущільнень з різними типами поверхневої модифікації.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Перспективні конструкції та методики числового та аналітичного розрахунків трибологічних, витратних і стійкісних характеристик ущільнень та опор відцентрових машин, до яких відносяться:

- методика оцінювання динамічних коефіцієнтів жорсткості і демпфування різних типів міжсекційних ущільнень ротора компресора високого тиску;

- методика аналізу параметрів гідродинамічного мащення та теплового стану упорного колодкового підшипника ковзання;

- методики та програмні модулі для автоматизованого розрахунку пристроїв осьового врівноваження, торцевих ущільнень, ущільнень-опор та динаміки ротора відцентрових насосів;

– методика числового розрахунку коефіцієнтів жорсткості та демпфування вбудованих опорних підшипників ковзання та аналіз їх впливу на динаміку ротора багатоступінчастого насоса ЦНС 90-1900;

– методики розрахунків радіальних і торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя;

– методики розрахунку динамічних характеристик роторів відцентрових насосів з багатошпаринними ущільненнями, запірної гідропр'яти живильних насосів для парових котлів, імпульсних торцевих ущільнень;

– методика розрахунку витратних та ротородинамічних характеристик конструкцій лункових та лабіринтно-лункових ущільнень відцентрових компресорів;

– методика розрахунку характеристик турбіни з урахуванням різного типу безконтактних ущільнень між кромкою лопатки і стінками ротора та статора.

2. Результати роботи впроваджені у виробничих підприємствах, проектних та дослідницько-випробувальних установах України, серед яких СКБ АТ «СМНВОІнжиніринг», АТ «ВНДІАЕН», ПАТ «Азот», ТОВ «ТРІЗ» ЛТД, Корейський інституту науки і технологій, Техаський інститутом науки.

3. Наукові результати роботи та методики інженерного розрахунку використовуються у навчальному процесі Сумського державного університету.

Повнота викладення основних результатів дисертації.

За темою дисертації опубліковано 87 наукових праць, з них 2 публікації у вигляді розділів монографії; 17 статей у фахових спеціалізованих виданнях; 15 статей у виданнях, що внесені до наукометричних баз даних SCOPUS та/або WoS; 9 статей у іноземних спеціалізованих виданнях; 7 публікацій у матеріалах конференцій, що внесені до наукометричних баз даних SCOPUS та/або WoS; 26 матеріалів і тез конференцій; 3 закордонних патенти на винахід, 3 патенти України на корисну модель; 5 авторських прав на твір.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота на тему «Наукові основи трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин» є завершеною науковою працею, в якій вирішена важлива науково-прикладна проблема створення наукових основ трибологічного забезпечення герметизації, мащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин, що базуються на керуванні геометрією поверхонь, гідростатичним, гідродинамічним і змішаним видами мащення та тепловим станом мастильного середовища з метою підвищення несучої здатності, мінімізації тертя, витоків, обмеження зношування та підвищення динамічної стійкості роторних систем.

Наведені вище зауваження не зменшують наукової та практичної цінності роботи.

Робота виконана на високому науковому рівні. Її нові теоретичні і практичні результати є актуальними, 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 світове визнання.

Зміст автореферату відповідає основним положенням і змісту дисертації. Положення і результати, що виносилися дисертантом на захист кандидатської дисертації не використані у даній дисертаційній роботі.

В цілому, робота відповідає вимогам пунктів 7, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року за №1197 до докторських дисертацій, 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.

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри машинобудування та
технічного сервісу машин
Українського державного університету
залізничного транспорту



Сергій ВОРОНІН
Особистий підпис *С. Воронін*
засвідчую 20 __ р.
Завідуючий канцелярією
УкрДУЗТ *е. ЧЕЛОВІТЬКО*