



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор
Хмельницького національного

Сергій МАТЮХ

«2» квітня 2016 р.

ВИСНОВОК

розширеного засідання (семінару)
кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертаційної роботи Загорулька Андрія Васильовича
на тему: «Наукові основи трибологічного забезпечення герметизації, змащення
та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

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

Одним із найбільш енергоємних видів сучасного промислового обладнання є динамічні агрегати - відцентрові насосні і компресорні машини та турбіни, робота яких супроводжується значними швидкостями ковзання, перепадами тиску та тепловими навантаженнями. Граничні робочі параметри турбомашин визначаються несучою здатністю мастильних шарів, втратами на тертя, інтенсивністю зношування, об'ємними витокami та вібраційним станом роторної системи. Усі ці фактори безпосередньо зумовлюються трибологічними характеристиками шпаринних і торцевих ущільнень та опор.

Трибологічний стан ущільнень і опор визначається параметрами контактної взаємодії поверхонь, режимом змащування, теплоутворенням у зоні тертя та в'язкісно-температурними властивостями змащувального середовища. Статичні характеристики вузлів формуються геометрією зазорів, мікро- і макрогеометрією поверхонь і гідродинамічними властивостями мастильної плівки, тоді як динамічні характеристики обумовлені зміною товщини змащувального шару та гідрогазодинамічними силами, що виникають у тонких зазорах при відносному русі поверхонь. Керуючи геометричними та режимними параметрами, можливо цілеспрямовано впливати на жорсткісні й демпфувальні властивості мастильної плівки, а отже - на рівень вібрацій і стабільність ротора.

Здобувач провів цілий ряд експериментальних досліджень і впровадив у практику підприємств машинобудівного комплексу України конструкції і методики числових розрахунків перспективних конструкцій ущільнень та опор відцентрових машин.

У зв'язку з цим розроблення наукових основ трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин є актуальною науковою проблемою у галузі тертя та зношування в машинах. Її

вирішення спрямоване на встановлення фундаментальних закономірностей формування мастильних шарів, прогнозування зношування та створення конструктивних і технологічних рішень, що забезпечують підвищення зносостійкості, енергоефективності та динамічної стабільності роторних агрегатів.

Актуальність теми дисертації та вибраний напрямок досліджень, пов'язані з виконанням держбюджетних науково-дослідних робіт №0117U002249, №0120U102004, №0123U101853, №0120U104164, №0123U103299 Сумського державного університету, в яких здобувач був науковим керівником.

Конкретна особиста участь автора в одержанні результатів.

Основні результати досліджень, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані автором особисто та полягають у наступному:

- розробці методик числового розрахунку гідродинамічних сил і моментів, а також оцінювання динамічних коефіцієнтів жорсткості і демпфування мастильного шару шпаринних та лункових демпферних ущільнень-опор;
- розробці методик аналітичного розрахунку статичних і динамічних стійкісних характеристик реакції рідинного і газового мастильного шарів перспективних конструкцій запірних імпульсних ущільнень, запірних врівноважувальних пристроїв та регулятора перепаду тиску сухих газових ущільнень;
- розробці моделей аналізу впливу деформацій на статичну і динамічну стійкість плаваючого та закріпленого кілець шпаринного ущільнення;
- розробці методики розв'язання задачі пружногідродинамічного змащення конструкцій торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя;
- розробці методик числового розв'язання задачі термогазодинамічного змащення та визначення силових і температурних деформацій, а також динамічних характеристик запірних імпульсних газових ущільнень;
- розробці методик числового аналізу термогідродинамічного і гідродинамічного змащення в упорних колодкових ущільненнях ковзання і опорних кулькових підшипниках кочення;
- створення оригінальних експериментальних стендів для досліджень запірних імпульсних та торцевих сальникових ущільнень, модернізації стендів для досліджень багатощпаринних ущільнень і регулятора перепаду тиску;
- розробці рекомендацій щодо застосування методик розрахунку, методів обчислювальної механіки, планування експерименту та оптимізації ущільнень і опор, що забезпечує підвищення енергоефективності відцентрових машин та зниження шкідливих викидів і вібрацій.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій, які захищаються.

- обґрунтованість і достовірність досліджень підтверджується теоретичними та експериментальними результатами, отриманими протягом 2003-2025 рр.;

- достовірність результатів досліджень забезпечується використанням сучасного вимірювального обладнання та застосуванням сучасних методів обчислювальної механіки для розв'язання задач гідро- та газодинаміки, теплопередачі, механіки деформованого твердого тіла та контактної взаємодії;

- достовірність теоретичних положень і обґрунтованість висновків дисертаційної роботи підтверджується задовільною узгодженістю результатів числового моделювання з експериментальними даними.

Основні результати дослідження, ступінь їх наукової новизни та значущості.

Отримані в процесі дослідження наукові результати дозволили створити наукові основи трибологічного забезпечення герметизації, змащення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин з використанням методів числового моделювання та експерименту.

Основні положення, що визначають наукову новизну дисертаційної роботи, полягають в наступному:

- *вперше* встановлено закономірності формування гідростатичних і гідродинамічних сил, моментів, коефіцієнтів жорсткості та демпфування у шпаринних ущільненнях різної довжини («коротких» і «довгих») при прецесійному русі ротора, що дозволяє визначати умови переходу потоку у спіралеподібний режим і межі статичної та динамічної стійкості ущільнення-опори;

- *вперше* досліджено трибологічні особливості 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;

- *вперше* виявлено вплив 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, що дає можливість керувати жорсткістими та демпфувальними властивостями вузла;

- *вперше* встановлено, що геометричні параметри вхідного в'язкісного дроселя та демпферної камери істотно впливають на точність регулювання робочого перепаду тиску і межі динамічної стійкості рухомої частини регулятора перепаду тиску прямої дії системи сухих газових ущільнень за умов гідростатичного змащення;

- *вперше* встановлено закономірності впливу режимних (робочого перепаду тиску та швидкості обертання вала) і конструктивних (глибини та кількості камер і живильників, провідності вхідного в'язкісного дроселя) параметрів

(модифікацій поверхні) на формування розподілів гідростатичного тиску і температури, розкриваючої сили, моменту в'язкого тертя, статичної та динамічної жорсткості і демпфування змашувальної плівки, витоків, силових і температурних деформацій кілець, що у сукупності забезпечують підтримання величини і форми зазору та відсутність зношування кілець торцевих імпульсних ущільнень при гідростатичному режимі змащення;

- *вперше* встановлено, що охолодження мастильного шару та відведення частини нагрітого потоку скребками із термонавантаженої зони колодки дозволяє зменшити мінімальний зазор і підвищити несучу здатність упорного підшипника ковзання за рахунок зниження температурно-в'язкісної деградації мастила в умовах термогідродинамічного змащення;

- *вперше* встановлено 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, формування ділянок несиметричного розподілу тиску в окружному напрямку, зниження максимальних контактних напружень, моменту тертя і зношування при змішаному змащенні;

- *вперше* досліджено вплив гідродинамічного змащення на формування гідродинамічних сил, які діють на прецесуючий сепаратор, а також на момент в'язкого тертя між обертаючимися кульками та внутрішньою обертовою та зовнішньою нерухомою доріжками кріюгенного підшипника кочення рідкого азоту;

- *набуло подальшого розвитку* визначення трибологічних характеристик торцевої пари з модифікованими поверхнями та встановлено закономірності формування динамічної стійкості безконтактних газових торцевих ущільнень з різними типами поверхневої модифікації (конусність, хвилястість, спіральні та радіальні канавки), які визначають вплив кутової швидкості і геометричних параметрів мікрорельєфу та гідростатичного і гідродинамічного змащення на амплітуду кутових коливань статора та умови її мінімізації.

Практичне значення роботи.

До результатів, які мають найбільшу практичну цінність відносяться:

1. Розроблені і впроваджені в АТ «СМНВО-Інжиніринг» (м. Суми, Україна): методика числового та аналітичного статичного і динамічного розрахунків характеристик регулятора перепаду тиску (РПТ) «газ-газ» прямої дії для системи сухих газових ущільнень; методика числового оцінювання динамічних коефіцієнтів жорсткості і демпфування різних типів міжсекційних ущільнень ротора компресора високого тиску; методика числового аналізу гідродинаміки та теплового стану упорного колодкового підшипника ковзання; методики та програмні модулі для автоматизованого числового та аналітичного розрахунків пристроїв осьового врівноваження, торцевих ущільнень, ущільнень-опор та динаміки ротора відцентрових насосів. Запропонована модернізована односідельна конструкція РПТ з фрезерованими проточками сідла золотника та з демпфуючою камерою і дроселем ламінарного потоку.

2. Розроблені і впроваджені в АТ «ВНДІАЕН» (м. Суми, Україна): методика числового розрахунку коефіцієнтів жорсткості та демпфування вбудованих опорних підшипників ковзання багатоступінчастого насоса ЦНС 90-1900; методики числового та аналітичного розрахунків торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя; методика числового розрахунку динамічних характеристик роторів відцентрових насосів з урахуванням багатощпаринних ущільнень; методика аналітичного та числового розрахунків запірної гідроп'яти живильних насосів для парових котлів; методика числового розрахунку імпульсних торцевих ущільнень відцентрових насосів.

3. Розроблені і впроваджені в «ТРИЗ» ЛТД ТОВ (м. Суми, Україна): методика аналітичного та числового розрахунків запропонованих конструкцій запірної торцевої імпульсної ущільнення компресора синтез-газу та компресора вуглекислого газу для підприємства ПАТ «Азот» (м. Черкаси); методика числового розрахунку задачі термогідродинамічного змащення упорного восьмилопасткового підшипника ковзання зі скребками і охолодженням термонавантаженої зони; методика розрахунку витратних та ротородинамічних характеристик конструкцій лункових та лабіринтно-лункових ущільнень відцентрових компресорів; методика числового розрахунку характеристик турбіни з урахуванням різного типу безконтактних ущільнень між кромкою лопатки і стінками ротора та статора.

4. Запропоновані наукові концепції безвального карданного магнітного насоса.

5. У колективі авторів отримано премію Кабінету Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій на тему: «Розробка і впровадження відповідальних вузлів роторних машин, що забезпечують екологічну безпеку шкідливих виробництв» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 16 червня 2021 року № 657-р).

6. Отримані результати роботи та методики розрахунку використовуються у навчальному процесі Сумського державного університету при підготовці бакалаврів, магістрів та аспірантів за спеціальностями: 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування. Технічну новизну розробок захищено патентами.

Повнота викладення матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок у них автора.

За темою дисертації опубліковано 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 (зокрема, у виданнях, віднесених до кuartилів $Q1 - 8$, $Q3 - 6$; $Q4 - 1$); 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 і 3 патенти на корисну модель України; 5 авторських прав на твір.

**У фахових виданнях, що внесені до наукометричних баз даних SCOPUS
та/або WoS:**

1. А.В. Загорулько. Теоретические и экспериментальные исследования торцовых затворных импульсных уплотнений с дискретным подводом. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* 08/2015; 4(7(76)):45-52 (Q3; <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.48298>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84980027955&origin=recordpage>).
2. Zahorulko, A. Experimental investigation of mechanical properties of stuffing box packings. *Sealing Technology* 2015(8):7-13 (Q4; [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(15\)30244-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(15)30244-0); <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940506180&origin=recordpage>).
3. Загорулько А., Лісовенко Д., Марцинковський В. Розробка та дослідження торцевого запірною імпульсного ущільнення відцентрового компресора. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* 02/2016; 1(7(79)):30-39. (Q3; <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59884>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84960847656&origin=recordpage>). *Здобувачем запропонована методика статичного розрахунку та проаналізовані результати експериментальних досліджень конструкції торцевого запірною імпульсного ущільнення відцентрового компресора.*
4. Slawomir Blasiak, Andriy V. Zahorulko. A Parametric and Dynamic Analysis of Non-Contacting Gas Face Seals with Modified Surfaces. *Tribology International*, Volume 94, February 2016, Pages 126–137. (Q1; <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.014>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84941299537&origin=recordpage>). *Здобувачем проведено аналіз впливу рельєфу поверхонь сухих газових торцевих ущільнень на коливання взаємодіючих кілець.*
5. Pozovnyi, O., Zahorulko, A., Krmela, J., Artyukhov, A., Krmelová, V. Calculation of the characteristics of the multi-gap seal of the centrifugal pump, in dependence on the chambers' sizes (2020). *Manufacturing Technology*, 20 (3), pp. 361-367 (Q3; https://journalmt.com/artkey/mft-202003-0007_calculation-of-the-characteristics-of-the-multi-gap-seal-of-the-centrifugal-pump-in-depend-ence-on-the-chamber.php; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85090984049&origin=recordpage>). *Здобувачем проаналізовано результати експериментального дослідження та числового розрахунку впливу осьового розміру з'єднувальних камер на розподіл гідростатичного тиску та на величину витоків в трьохшаринному ущільненні.*
6. Zahorulko, A.V., Lee, Y.-B. Computational analysis for scallop seals with sickle grooves, part I: Leakage performance (2021). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107024 (Q1; <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107024>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85088998734&origin=recordpage>). *Здобувачем запропоновано методику числового*

розрахунку витратних характеристик в залежності від геометрії лункового ущільнення з серповидними канавками.

7. Kim, J., Ha, Y., Zahorulko, A., Lee, Y. Performance assessments and simulations of ROT (radial outflow turbine) for back-pressure turbine generator system (2021). *Energy*, 228, 120551 (Q1; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120551>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85104079805&origin=recordpage>).

Здобувачем запропоновано методику числового аналізу впливу величини зазору між кромкою лопатки і статором на к.к.д. та вихідну потужність турбіни радіального потоку.

8. Zahorulko, A.V., Lee, Y.-B. Computational analysis for scallop seals with sickle grooves, part II: Rotordynamic characteristics (2021). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107154 (Q1; <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107154>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85089006596&origin=recordpage>).

Здобувачем запропоновано методику числового розрахунку фізики потоку і ротородинамічних коефіцієнтів жорсткості та демпфування лункових демпферних ущільнень.

9. Peczkis G, Wiśniewski P, Zahorulko A. Experimental and Numerical Studies on the Influence of Blade Number in a Small Water Turbine. *Energies*. 2021; 14(9):2604 (Q1; <https://doi.org/10.3390/en14092604>;

<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85106398952&origin=recordpage>).

Здобувачем запропоновано методику числового розрахунку гідродинаміки та к.к.д. водяної турбіни Каплана з різною кількістю лопатей.

10. Zahorulko A.V., Lee Y.-B. Dynamic behavior and difference pressure control of difference pressure regulator for dry gas seals (2022). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, 108350 (Q1; <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108350>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85113404530&origin=recordpage>).

Здобувачем запропоновано аналітичний метод розрахунку характеристик та проаналізовано вплив турбулентного вхідного дрoселя на статичні характеристики та ламінарного дрoселя в демпферній камері на динамічну стійкість регулятора перепаду тиску системи сухих газових ущільнень.

11. Zahorulko, A., Borsuk, S., Peczkis, G. (2022). Computational analysis of sealing and stability of a deformable floating and fixed rings of an annular seal. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 9(1), pp. D20-D29 (Q3;

<https://jes.sumdu.edu.ua/computational-analysis-of-sealing-and-stability-of-a-deformable-floating-and-fixed-rings-of-an-annular-seal/>;

<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001222788700012>).

Здобувачем запропоновано розв'язання задачі гідропружності для плаваючих та нерухомих кілець деформованого шпаринного ущільнення.

12. Zahorulko A., Peczkis G., Sapozhnykov Y. (2022). Numerical calculation of 2-way FSI problem of face packing seal: Analysis of parameters change influence. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 9(2), pp. E12-E20. (Q3;

<https://jes.sumdu.edu.ua/numerical-simulation-of-2-way-fsi-problem-of-face-packing>

[seal-impact-of-parameters-change/](#); <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001222703500007>). Здобувачем проаналізовано вплив зміни робочих та геометричних параметрів на величину витоків та розподіл гідростатичного та контактного тиску по ширині пари тертя торцевого сальникового ущільнення.

13. Zahorulko, A., Pozovnyi, O., Peczkis, G. (2023). CFD study of radial and tangential forces in two-annular seals. *Tribology International*, 184, 108449 (Q1; <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108449>;

[https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85151881207&origin=recordpage)

[85151881207&origin=recordpage](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85151881207&origin=recordpage)). Здобувачем запропоновано розрахунковий метод та проаналізовано вплив геометричних параметрів з'єднувальної камери та дифузорної конусності другої шпарини на величину та напрямок радіальної та тангенціальної сил в двошпаринному ущільненні.

14. Andriy Zahorulko, Oleksandr Pozovnyi, Grzegorz Peczkis, Experimental and CFD analysis of static and dynamic rotor stabilities in three-annular seals, *Tribology International*, Volume 185, 2023, 108566. (Q1; <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108566>;

[https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85158000416&origin=recordpage)

[85158000416&origin=recordpage](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85158000416&origin=recordpage)). Здобувачем запропоновано розрахунковий і експериментальний методи та пояснено механізми формування децентруючої та дестабілізуючої сил в трьохшпаринних ущільненнях.

15. Noël Brunetière, Andriy Zahorulko, Jean Bouyer, Numerical Simulation of the Behavior of Impulse Gas Seals, *Tribology Online*, 2024, Volume 19, Issue 4, Pages 360-366 (Q3; <https://doi.org/10.2474/trol.19.360>;

[https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85198339391&origin=recordpage)

[85198339391&origin=recordpage](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85198339391&origin=recordpage)). Здобувачем досліджено вплив робочих умов та об'єму камери на товщину газової плівки імпульсного газового ущільнення.

У матеріалах конференцій, що внесені до наукометричних баз даних

SCOPUS та/або WoS:

16. Gaft, J., Martsinkovsky, V., Zagorulko, A., Gromyko, V. Design and calculation of mechanical seals with self-adjusting clearance (2003) *International Conference on Fluid Sealing*, pp. 505-520 (<https://surl.li/vefzvl>;

[https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-2642552273&origin=recordpage)

[2642552273&origin=recordpage](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-2642552273&origin=recordpage)). Здобувачем запропоновано методику розрахунку та виконані експериментальні дослідження статичних характеристик подвійного імпульсного торцевого ущільнення з саморегульованим зазором.

17. V. Martsynkovskyy, A. Zahorulko, S. Gudkov, S. Mischenko. Analysis of buffer impulse seal. *Procedia Engineering*, Volume 39, 2012, pp. 43-50 (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.006>;

[https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84901012235&origin=recordpage)

[84901012235&origin=recordpage](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84901012235&origin=recordpage)). Здобувачем проведений аналіз впливу провідності дроселя для підведення запірною середовища на статичні характеристики запірною імпульсного ущільнення.

18. Andrzej Korczak, Volodymyr Marcinkovsky, Grzegorz Peczkis, Andriy Zahorulko. Diagnosis of the phenomenon of flow as an inspiration to inventions in the domain of constructing hydraulic machines. *Procedia Engineering*, Volume 39, 2012, pp. 286-302 (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.035>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84901021609&origin=recordpage>). Здобувачем запропонована конструкція запірною врівноважуючого пристрою відцентрового насоса котла та виконано числовий розрахунок ламінарної відцентрової течії через торцевий зазор.
19. A. Radionov, A. Podoltsev, A. Zahorulko. Finite-element analysis of magnetic field and the flow of magnetic fluid in the core of magnetic-fluid seal for rotational shaft. *Procedia Engineering*, Volume 39, 2012, pp. 327-338 (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.038>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84893174410&origin=recordpage>). Здобувачем виконаний числовий аналіз магнеторідинного ущільнення обертового вала.
20. A. Zahorulko, C. Kundera, S. Hudkov. Determination of mechanical characteristics of stuffing box packings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 08/2017; 233(1):012039 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/233/1/012039>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85029897854&origin=recordpage>). Здобувачем визначені механічні властивості сальникових набивок.
21. C. Kundera, V. Martsynkovsky, A. Zahorulko. Remarks on modeling the flexible seal ring housing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 08/2017; 233(1):012034 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/233/1/012034>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85029901386&origin=recordpage>). Здобувачем проаналізовано результати моделювання пружно-демпферних властивостей гнучкого корпусу ущільнювального кільця.
22. Martsynkovsky, V.A., Hudkov, S.M., Zahorulko, A.V., Kundera, C. Dynamics of impulse seals with tubular feeders (2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 1741 (1), 012033 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1741/1/012033>; <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85101839526&origin=recordpage>). Здобувачем запропоновано методику розрахунку вимушених осьових коливань та стійкості торцевих імпульсних ущільнень з трубчастими живильниками.

У фахових спеціалізованих виданнях:

23. Czeslaw Kundera, Vladimir Martsinkovsky, Andrey Zahorulko. Drgania pierscienia podatnie zamocowanego w bezстыkowym uszczelnieniu czolowym. *Вісник Технологічного університету Поділля*, №6, Ч.1, Т.2, 2003. Р. 230-234 (<http://surl.li/gewzef>). Здобувачем сформульовано та розв'язано математичну модель, яка описує осьові коливання кільця безконтактного торцевого ущільнення.

24. Загорулько А.В., Кундера Ч., Харин М.Ю. Исследование влияния проводимости подводящего дросселя на статические характеристики затворного импульсного уплотнения. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*, 2005. - №1(73). – Р. 76-85 (<https://surl.li/svnbuy>). Здобувачем розроблена експериментальна установка, проведені та проаналізовані результати експериментальних досліджень двохступінчатих торцевих імпульсних ущільнень з коаксіальним розташуванням ступенів.
25. Загорулько А.В., Кундера Ч. Теоретические и экспериментальные исследования затворных импульсных уплотнений с непрерывным подводом. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія “Механізація та автоматизація виробничих процесів”*, випуск №11(14), 2005. – С. 65-73 (<https://surl.li/jsgtv1>). Здобувачем запропонована математична модель і проведені дослідження запірного імпульсного ущільнення з неперервним підводом запірного середовища.
26. Герасимива Е.П., Загорулько А.В., Кундера Ч. Программное приложение для автоматизированного расчета динамических характеристик роторов центробежных машин. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія “Механізація та автоматизація виробничих процесів”*, випуск №9(15), 2006. – С. 168-176 (<https://surl.lu/pzclbe>). Здобувачем запропоновано програмний додаток для автоматизованого розрахунку динаміки ротора.
27. Загорулько А., Герасимива К., Пликін М. Числовой анализ динамических характеристик шпаринных ущільнень. *Машинознавство*, №10, 2007. – С. 23-29 (<https://surl.lu/pamrty>). Здобувачем запропоновано розрахункову модель для розрахунку статичних й динамічних характеристик шпаринних ущільнень з урахуванням прецесії вала.
28. Загорулько А.В., Гудков С.Н. Экспериментальные исследования новых конструкций торцевых сальниковых уплотнений с гидродинамической разгрузкой пары трения. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, №3 (109), частина 1, 2007. – С. 91-97 (<https://surl.li/myrmhe>). Здобувачем запропоновано нові конструкції та проаналізовано результати експериментальних досліджень торцевих сальників з гідродинамічним розвантаженням пари тертя.
29. Кундера Ч., Михальський Д., Загорулько А.В. Экспериментальные исследования саморегулируемого торцевого уплотнения. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*, №1, 2007. – С. 39-45 (<https://surl.li/ppnhls>). Здобувачем проаналізовано результати теоретичних і експериментальних досліджень саморегульованого безконтактного торцевого ущільнення.
30. Е.П. Герасимива, А.В. Загорулько, В.С. Ноздренков. Численное решение двумерной задачи течения жидкости в щелевом уплотнении методом конечных объемов. *Проблемы машиностроения*, №6 -2009. - С. 23-29 (<https://surl.li/yzvmfk>). Здобувачем сформульовано математичну модель числового розрахунку параметрів течії рідини в гладкому шпаринному ущільненні ротора турбомашини.

31. А.В. Загорулько, К.П. Герасимива, Е.И. Алтынцев, С.Н. Гудков. Компьютерное моделирование пространственного течения в кольцевом канале щелевого уплотнения-опоры. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, №6/7(42) - 2009. - С. 22-27 (<https://surli.cc/gflgvv>). Здобувачем виконано числовий аналіз шпаринного ущільнення-опори та отримані динамічні коефіцієнти жорсткості і демпфування.
32. Марцинковский В.А., Загорулько А.В., Мищенко С.А. Динамика затворной гидропаты. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*, № 2, 2010. С. 24-34 (<https://surl.li/pbhvny>). Здобувачем отримано лінеаризоване рівняння динаміки нової перспективної конструкції автоматичного врівноважуючого пристрою багатоступеневої відцентрової машини.
33. Загорулько А.В., Гудков С.Н. Решение задачи упругогидродинамической смазки для пары трения торцевого сальникового уплотнения. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*, №3, 2010. С. 75-82 (<https://surl.li/viabfn>). Здобувачем запропонована числова модель та виконаний числовий розрахунок торцевого сальникового ущільнення з гідродинамічними канавками.
34. С.Н. Гудков, А.В. Загорулько. Ресурсные испытания торцевых уплотнений с реверсивными канавками. *Технологический аудит и резервы производства* - № 1/1(21), 2015:11-15 (http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2015_1%281%29_4). Здобувачем проведені ресурсні випробування торцевого сальникового ущільнення з реверсивними канавками.
35. Д.О. Кайота, А.В. Загорулько, С.В. Паненко. Аналіз теплового стану упорного колодкового підшипника ковзання. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, № 3 (53) Сентябрь 2018, С. 2-7 (http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kiem_2018_3_3). Здобувачем запропоновано методику числового аналізу гідродинаміки та теплового стану упорного колодкового підшипника ковзання.
36. Д.В. Лісовенко, А.В. Загорулько, В.А. Марцинковский. Числовий розрахунок трибологічних характеристик торцевої пари зі спіральними канавками. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, № 1 (55) Март 2019, С.13-17 (http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kiem_2019_1_5). Здобувачем запропоновано методику числового розрахунку трибологічних характеристик торцевої пари зі спіральними канавками.
37. А.В. Загорулько, В.А. Марцинковский. Нестационарный анализ двофазной течи та динамічних коефіцієнтів кільцевих ущільнень. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, № 2 (56) Июнь 2019, С. 24-30 (http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kiem_2019_2_7). Здобувачем запропоновано методику числового розрахунку шпаринного ущільнення з рідинногазовим середовищем.
38. Sapozhnykov, Y., & Zahorulko, A. (2024). Computational studies of stuffing box packing seal wear mechanism using the Archard model. *Problems of Tribology*, 29(2/112), 6–15 (<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-112-2-6-15>). Здобувачем запропонована числова модель розрахунку напружено-деформованого стану та контакту набивки радіального сальникового ущільнення.

39. Izemenko, V., Zahorulko, A., & Zahorulko, Y. (2024). Leakage and rotordynamic coefficients of labyrinth-scallop seals. *Problems of Tribology*, 29(4/114), 14–23 (<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-114-4-14-23>). Здобувачем запропоновано методику та проаналізовані результати числового розрахунку витратної характеристики лабіринтно-лункового ущільнення.

У іноземних спеціалізованих виданнях:

40. Гафт Я.З., Кундера Ч., Бережной И.С., Загорулько А.В., Харин М.Ю. Экспериментальные исследования двойных импульсных уплотнений. *Компрессорная техника и пневматика*, №2, 2005. – С. 26-30 (<https://surl.li/vlscth>). Здобувачем проведені експериментальні дослідження і виконана верифікація розрахункової моделі двохступінчатих імпульсних ущільнень.

41. Cz. Kundera, A. Korczak, A. Zagorulko, K. Gerasimiva, M. Plykin. Numerical simulations of short and long annular seal. *Scientific Proceedings of Kielce University of Technology*, Series of Machine Building, Kielce (Poland), №7, 2007. – P. 77-89 (<https://surl.li/ivxllh>). Здобувачем запропонована числова модель розрахунку «короткого» та «довгого» шпаринних ущільнень.

42. A. Zahorulko, S. Gudkov, J. Gaft. Experimental investigations of physical-mechanical properties of packings. *Scientific Proceedings of Kielce University of Technology*, Series of Machine Building, Kielce (Poland), №10, 2008. – P. 115-121 (<https://surl.lt/kdrup>). Здобувачем проведені експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей сальникових набивок.

43. A. Zahorulko, S. Korolev, S. Gudkov. Theoretical and experimental investigations of difference pressure regulator „gas-gas” of dry gas seals systems of compressors. *Scientific Proceedings of Kielce University of Technology*, Series of Machine Building, Kielce (Poland), №10, 2008. – P. 123-138 (<https://surl.li/jgrblg>). Здобувачем проведені теоретичні та експериментальні дослідження статичних і динамічних характеристик регулятора перепаду тиску «газ-газ» сухих газових ущільнень відцентрових компресорів.

44. A. Zahorulko, K. Gerasimiva, Y. Altyncev. Numerical analysis of annular seals-bearings. *Scientific Proceedings of Kielce University of Technology*, Series of Machine Building, Kielce (Poland), №10, 2008. – P. 105-113 (<https://surl.li/efvmwb>). Здобувачем виконаний числовий аналіз та проаналізовано вплив шпаринного ущільнення-опори на динаміку ротора відцентрового насоса.

45. Andrzej Korczak, Grzegorz Peczkis, Andrzej Zagorulko. Badania laboratoryjne ruchowych uszczelnień czołowych z elastoplastycznym pierścieniem oporowym. *Scientific Proceedings of Kielce University of Technology*, Series of Machine Building, Kielce (Poland), №13, 2009. - P. 196-205 (<https://surl.lu/wexags>). Здобувачем проаналізовано результати лабораторних випробувань торцевих ущільнень з сальниковою набивкою.

46. Andrzej Korczak, Roman Kustos, Andriej Zahorulko. Centrifugal pump for supporting operation of heart left ventricular. *Pumps and pumping stations*, 4/2010 - P. 32-34 (<https://surl.li/elkoya>). Здобувачем запропоновано розрахункову модель

проточної частини робочого колеса допоміжного насоса для лівого шлуночка серця.

47. Andrzej Korczak, Wołodimir A. Marcinkowski, Grzegorz Peczkis, Andriej W. Zagorulko. Badania uszczelnień czołowych ze szczeliwem elastoplastycznym. Napędy i sterowanie, Nr. 5 Maj 2011 r., P. 114 – 121 (<https://surli.cc/jxmebc>). Здобувачем проведений аналіз результатів експериментальних досліджень торцевих сальникових ущільнень.

48. Andriy Zahorulko, Oleksandr Pozovnyi, Grzegorz Peczkis. **Badania numeryczne uszczelnienia dwupierścieniowego.** Pompy Potpownie, 1/2023. P. 84-94 (<https://surl.lu/owextv>). Здобувачем проведений аналіз результатів числових досліджень двошпаринних ущільнень.

За патентами та свідоцтвами:

49. В.А. Марцинковский, Я.З. Гафт, А.В. Загорулько. Уплотнение вала. Патент RU 2181453. – 2002 (<https://surl.lu/zyxobi>). Здобувачем запропоновано конструкцію торцевого сальникового ущільнення з вирівнюванням контактного тиску.

50. Andrzej Korczak, Włodzimierz A. Marcinkowski, Grzegorz Peczkis, Andrzej W. Zagorulko. Zespół tarczy odciążającej siłę osiową pompy do zasilania kotłów parowych. Patent of Poland PL 209054 B1. - 29.07.2011 (<https://api-ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/api/collection/4a9f8744ad0d94c0a7eb72296fa3b6ed#search=%22209%20054%22>). Здобувачем запропоновано конструкцію запірною пристрою осевого зрівноваження ротора насоса парового котла.

51. Andrzej Korczak, Grzegorz Peczkis, Andrey Zagorulko. Pozioma pompa odśrodkowa wielostopniowa. Patent of Poland PL 216809 B1. - 30.05.2014 (<https://api-ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/api/collection/0b56692f35ff93daccce733a79795bb8>). Здобувачем запропоновано конструкцію пристрою осевого та радіального зрівноваження ротора багатоступеневого відцентрового насоса.

52. С.М. Гудков, А.В. Загорулько. Сальникове ущільнення з гідродинамічним розвантаженням пари тертя. Патент на корисну модель України №141983, 12.05.2020, Бюл. № 9 (<https://surl.li/xeknvk>). Здобувачем запропоновано конструкцію торцевого сальникового ущільнення з гідродинамічним розвантаженням пари тертя.

53. Загорулько А.В., Таран І.В. Комп'ютерна програма "ROLL_ПОДШИПНИК". Рішення про реєстрацію договору, який стосується права автора на твір, реєстраційний номер 6385 від 28.10.2021 – Номер заявки s202100398, 21.10.2021 (<https://surl.li/ddszbm>). Здобувачем запропоновано програмний додаток для автоматизованого розрахунку ущільнень-опор.

54. Загорулько А.В. Комп'ютерна програма "ROLL_Торцеве ущільнення". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №109303 від 10.11.2021 – Номер заявки s202107535, 21.10.2021 (<https://surl.li/ttqjau>).

55. Загорулько А.В. Комп'ютерна програма "ДИПРОТОР". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №109033 від 02.11.2021 – Номер заявки s202107268, 11.10.2021 (<https://surl.lu/phfrru>).
56. Загорулько А.В. Комп'ютерна програма «ROLL-ГИДРОПЯТА». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №109306 від 10.11.2021 - Номер заявки s202107532, 21.10.2021 (<https://surl.lu/gheecp>).
57. Загорулько А.В. Запірне торцеве імпульсне ущільнення з регулюванням тиску запірного середовища. Пат. на корисну модель 160618 Україна: МПКF16J 15/34. №и 2024 05986; заявл. 2024-12-17; опубл. 2025-09-24, Бюл. № 39 (<https://surli.cc/jnasqm>).
58. Загорулько А.В.; Позовний О.О. Двошпаринне ущільнення зі з'єднувальною камерою збільшеного радіального розміру. Пат. на корисну модель 160315 Україна: МПКF04D 29/16. №и 2024 06116; заявл. 2024-12-23; опубл. 2025-08-27, Бюл. № 35 (<https://surl.li/foqqsd>). *Здобувачем запропоновані геометрії з'єднувальних камер двохшпаринних ущільнень збільшеного радіального розміру.*
59. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Науковий твір «Методика інженерного розрахунку торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя» № 140588 Україна / Загорулько А.В., Гудков С.М.; СумДУ; заяв. 2025-09-09; опубл. 2025-11-06 (<https://surl.li/dciqyj>). *Здобувачем запропонована методика числового розрахунку торцевих сальникових ущільнень з гідродинамічним розвантаженням пари тертя.*

За розділами монографій:

60. Герасиміва К.П., Загорулько А.В., Ноздренков В.С. Розрахунок динамічних характеристик коротких та довгих шпаринних ущільнень: Вибронадежность и герметичность центробежных машин: монографія / под редакцией В.А. Марцинковского, А.В. Загорулько. - Сумы: Сумский государственный университет, 2011. - С. 135-145 (<https://surl.li/pxxehw>). *Здобувачем запропоновано математичну модель, основу на методі малих збуджень, яка дозволяє оцінити динамічні коефіцієнти «короткого» та «довгого» шпаринних ущільнень.*
61. Dynamics and design problems of centrifugal machines. Collective monograph / edited by Czeslaw Kundera and Volodymyr Martsynkovskyy. Kielce 2016 – 106 p. Andriy Zahorulko, Sergii Gudkov. Chapter 5. Experimental definition of tribomechanical characteristics of stuffing box packings. P. 64-74 (<https://surl.lu/qskywc>). *Здобувачем визначені трибомеханічні характеристики сальникових набивок.*

Докторська дисертація не містить положення та наукові результати, які захищені автором у кандидатській дисертації.

Апробація результатів дисертації.

Здійснена на міжнародних наукових конференціях: XVII International Conference on Fluid sealing (м. Йорк, Велика Британія, 2003 р.), 10-13, 15, 16-й міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність та

екологічна безпека насосного і компресорного обладнання» - «ГЕРВІКОН, ГЕРВІКОН+НАСОСИ» (м. Суми, 2002, 2005, 2011, 2017, 2020 р.; м. Перемишль (Польща), 2008 р.), XI, XII International Conference “Seals and sealing technology in machines and devices” (м. Вроцлав, Польща, 2007, 2010), TEROTECHNOLOGIA conference (Kielce (Poland), 2007, 2009 р.), 10 та 13-й міжнародній науково-практичній конференції «Технології XXI сторіччя» (м. Алушта, 2003, 2006 р.), 7 та 8-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (2005, 2007 р.), XIII-ій міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення турбоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (м. Харків, 2009 р.), 3-й міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 2012 р.), 16th, 17th International Sealing Conference (м. Штутгарт, Німеччина, 2010, 2012 р.), 11th, 18th-21th PPrime Workshop on Seals and Bearings (м. Пуатьє-Футуроскоп, м. Париж-Сакле, м. Ангулем, Франція, 2012, 2019, 2022, 2024 р.), Korean Society for Fluid Machinery Conference (м. Йосу, м. Пхьончхан, Республіка Корея, 2018, 2019 р.), Korean KOSC International Conference (м. Почхон, Республіка Корея, 2018 р.), міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта" (м. Київ, 2018 р.), 6-й міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 2018 р.), Korean Tribology Society (KTS) 67th Spring Conference (м. Чеджу, Республіка Корея, 2019 р.), 9th International Tribology Conference (м. Фукуока, Японія, 2023 р.), 78th STLE Annual Meeting & Exhibition (м. Міннеаполіс, США, 2024 р.); на науково-технічних семінарах: лабораторії турбомашин Техаського А&М університету (м. Коледж-Стейшен, США, 2013 р.), інституті деталей машин Штутгартського університету (м. Штутгарт, Німеччина, 2012 р.), відділі машинобудування та складних систем Інституту ПіПрайм університету м. Пуатьє (м. Пуатьє, Франція, 2012, 2025 р.), лабораторії інновації роторних машин Корейського інституту науки і технологій (м. Сеул, Республіка Корея, 2018 р.), на кафедрі енергетичних машин та апаратів Сілезького технологічного університету (м. Глівіце, Польща, 2008 р.).

Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення.

Дисертаційна робота за своїм науковим рівнем, практичною цінністю, обсягом та оформленням повністю відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах», а саме:

- п.1: «Розроблення та застосування моделей і методів механіки контактної взаємодії поверхонь елементів машин з урахуванням тертя, зношування, мащення, деформування, температури, шорсткості, швидкості проковзування»;

- п.3: «Розроблення методів проведення випробувань на тертя та зношування устаткування, випробувальних стендів і трибологічних комплексів»;
- п.5: «Розрахунок і прогнозування параметрів тертя та зношування елементів машин з урахуванням зміни властивостей матеріалів, поверхонь тертя, мастильних матеріалів і зовнішніх чинників»;
- п.10: «Дослідження механізму мастильного впливу рідких, напіврідких, пластичних, твердих і газоподібних мастильних матеріалів».

Загальний висновок:

Враховуючи вищенаведене, розширене засідання (семінар) кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства Хмельницького національного університету рекомендує дисертаційну роботу Загорулька Андрія Васильовича на тему: «Наукові основи трибологічного забезпечення герметизації, змашення та стійкісних характеристик роторів відцентрових машин» подати до розгляду у спеціалізовану вчену раду з врахуванням наданих зауважень.

За затвердження висновку проголосували:

«за» - дев'ятнадцять;

«проти» - немає;

«утримались» - немає.

Голова розширеного засідання (семінару)
кафедри трибології, автомобілів
та матеріалознавства Хмельницького
національного університету
д-р техн. наук, професор

Олександр Диха

Секретар розширеного засідання (семінару)
кафедри трибології, автомобілів
та матеріалознавства Хмельницького
національного університету
канд. техн. наук, доцент

Олег Бабак

Рецензенти:

д-р техн. наук, професор

Олександр Диха

д-р техн. наук, професор

Віктор Олександренко

д-р техн. наук, професор

Павло Каплун

02.04.2026 р.