

Сумський державний університет
вул. Харківська, 116, м. Суми, Сумський р-н, Сумська обл., 40007, Україна,
Код ЄДРПОУ/ПІН: 05408289

ПОГОДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д-р фіз.-мат. наук, професор

_____ Анатолій ЧОРНОУС

м.п.

ПРОМІЖНИЙ ЗВІТ
за результатами виконання етапу наукової (науково-технічної) роботи
(звіт про проміжні результати проекту)
*«Підвищення несучої здатності, герметичності та динамічної стійкості
роторних систем турбомашин»*

Науковий керівник
(головний дослідник) проекту

_____ (підпис)

Андрій ЗАГОРУЛЬКО
(Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ)

2024 рік, номер етапу 1

Підготовку звіту завершено 28 грудня 2023 р.

1. Номер державної реєстрації проєкту: 0123U101853
2. Номер договору, за яким надається фінансування (за наявності):
3. Найменування організації-виконавця проєкту/грантоотримувача: Сумський державний університет
4. Прізвище та ім'я наукового керівника (головного дослідника, principal investigator (PI)) проєкту: Загорулько Андрій Васильович
5. Місце основної роботи наукового керівника: Сумський державний університет
6. Терміни та тривалість виконання проєкту:
 - Тривалість проєкту 36 місяців
 - Початок 01.01.2023
 - Закінчення 31.12.2025
 - Тривалість звітнього етапу 12 місяців
 - Початок 01.01.2023
 - Закінчення 31.12.2023
7. Обсяги фінансування проєкту:
 - Загальний обсяг фінансування:
 - за запитом (заявкою) 4300,0 тис. грн.
 - фактичний 3880,0 тис. грн.
 - Обсяг фінансування звітнього етапу:
 - за запитом (заявкою) 1400,0 тис. грн.
 - фактичний 980,0 тис. грн.
8. Перелік виконавців з оплатою праці (ПІБ, посада за основним місцем роботи, посада за проєктом (або договір ЦПХ), окремо зазначаються молоді вчені, студенти, аспіранти (за наявності)) (**Додаток 1 до звіту**).
9. Стислий зміст проєкту в цілому (актуальність, мета, основні завдання, ідеї, гіпотези тощо) (до 20 рядків):

Актуальність та значимість проєкту для отримання нових наукових знань полягає в тому, що у зв'язку з суттєвим збільшенням робочих тисків та швидкостей обертання ротора відцентрових машин підвищується складність проблем герметизації, підвищення несучої здатності та ротородинамічних характеристик шпаринних ущільнень-опор. В таких умовах дуже важливими є гідродинамічні сили, що діють у зазорах, і які можуть бути не тільки стабілізуючими, а і дестабілізуючими. Зменшення витоків та підвищення енергоефективності турбомашин можливо при використанні торцевих імпульсних та сальникових ущільнень. Наявність підведення запірного середовища, імпульсних камер і живильників та гідродинамічних структур змащення дозволить підвищити силу, яка розкриває зазор та знизити зношування при мінімально допустимих витках. Застосування комбінованих гідростатичних і гідродинамічних опор дозволить значно підвищити швидкість обертання роторної системи та потужність турбонасосних агрегатів рідинних ракетних двигунів, запобігатиме

можливим небезпечним контактам ротора з нерухомими частинами корпусу агрегату. Тому метою проведення робіт є встановлення загальних закономірностей впливу геометрії конструкцій на несучу здатність, витратні та ротородинамічні характеристики ущільнень-опор за допомогою комп'ютерного моделювання та його перевірки з результатами існуючих експериментальних досліджень.

10. Основні результати виконання попереднього (за наявності) етапу (до 20 рядків):

11. Номер та назва звітнього етапу (за наявності): 1 етап, назва: Розробка методик розрахунку і комп'ютерного моделювання ущільнень-опор роторних систем турбонасосів.

12. Опис процесу реалізації (хід виконання, які дослідження проводились, які методики використовувались тощо) проєкту за звітним етапом (до 50 рядків)

З використанням методів обчислювальної гідродинаміки в програмі ANSYS Academic Research CFD та числових методів планування експерименту (DOE) виконувалося визначення границі переходу від «короткого» до «довгого» шпаринного ущільнення-опори. Розв'язувалися задачі ламінарної та турбулентної течії з переважаючим осьовим і окружним потоком, з врахуванням і без врахування початкової закрутки на вході в ущільнення. Параметрично задавалася геометрія (діаметр і довжина ущільнення, висота зазору) та робочі параметри (ущільнювальний тиск та швидкість обертання вала) шпаринного ущільнення. Критерієм переходу вважалося переважаюче співвідношення між окружною і осьовою швидкостями. В стаціонарному розрахунку враховувалося радіальне зміщення вала (ексцентриситет). При великих значеннях радіального зміщення вала визначалася максимальна несуча здатність і перевірялась статична стійкість ущільнення-опори (присутність позитивного значення прямої жорсткості ущільнювального шару). В нестационарному розрахунку моделювалася прецесія вала за круговою траєкторією (визначалися гідродинамічні сили) і оцінювалися динамічні коефіцієнти жорсткості і демпфування, за величиною і знаком яких можна було встановити вплив окружної складової швидкості і наявність динамічної стійкості роторної системи.

При числовому аналізі двохшпаринних ущільнень виконувався аналіз впливу геометричних параметрів з'єднувальної камери на величину і напрямок сумарної радіальної гідростатичної сили, яка обумовлена ексцентриситетом осей валу і корпусу, а також на величину і напрямок сумарної тангенціальної сили, яка викликана прецесією і власним обертанням вала. Порівнювався розподіл фактора тертя стінки по довжині трьох конструкцій ущільнень: базової конструкції, конструкції з радіальною проточкою на зовнішньому радіусі корпусу та конструкції з радіальною проточкою на внутрішньому радіусі корпусу. Проаналізовано радіальні та тангенціальні сили в конструкції з дифузornoю конусністю на другій шпарині.

При ущільнювальному тиску 10 бар та при швидкості обертання 3000 об/хв з використанням CFD моделювання досліджувалася статична та динамічна стійкість двох базових конструкцій трьохшпаринного ущільнення: з однаковими радіальними зазорами на кожній шпарині і з вдвічі збільшеним радіальним зазором на другій шпарині при двох осьових розмірах з'єднувальних камер – 1 та 3 мм. Досліджувався вплив осьового розміру з'єднувальних камер та зазору другої шпарини на розподіл швидкостей по довжині та окружності ущільнення. Проводився аналіз внеску кожної

шпарини на величину гідродинамічних сил. Вивчався вплив на динамічну стійкість роторних та статорних ребер, розташованих у з'єднувальних камерах трьохшпаринного ущільнення. За рахунок аналізу гідродинаміки течії пояснювався механізм утворення децентруючих і дестабілізуючих сил в трьохшпаринних ущільненнях.

На базі Сілезького технологічного університету (м. Глівіце, Польща) експериментально досліджувалася модернізована конструкція багатоступеневого відцентрового насоса, в якому у якості другого підшипника використовувався опорно-упорний зрівноважуючий пристрій. Відносно висока швидкість обертання вала до 3000 об/хв, за рахунок достатньої величини гідростатичних жорсткостей циліндричної та торцевої шпарин, забезпечувала надійну роботу опорно-упорного вузла насоса. За допомогою датчиків радіального і осьового переміщення фіксувалися радіальна орбіта руху і осьові коливання вала при різних значеннях подачі насоса. Фіксувалися радіальні і осьові коливання вала при пуску і зупиненні насоса. Вимірювалася величина витоків і значення тиску в камері зрівноважуючого пристрою в залежності від величини ущільнювального тиску на вході в циліндричну шпарину. За допомогою методів обчислювальної гідродинаміки розв'язувалася задача радіально-осьових коливань вала і течії рідини в ущільнювальному зазорі циліндричної та торцевої шпарин.

Проводився аналіз впливу параметрів електроіскрового легування алюмінієвим електродом на якість (шорсткість, мікроструктуру покриття, його суцільність, фазовий склад, мікротвердість) алюмінізованого шару. Композитні покриття на поверхні підкладок з олов'яної бронзи формували методом електроіскрового осадження з почерговим нанесенням м'яких матеріалів срібла та сплаву Бабіт В83. Вплив їх осадження на масообмін, шорсткість поверхні, товщину покриття, морфологію поверхні, морфологію поперечного перерізу, елементний склад і трибологічні властивості композитних покриттів досліджували за допомогою електронних ваг, 3D оптичного профілометра, трибометра, а також використовували такі методи, як скануюча електронна мікроскопія, енергетична дисперсійна спектроскопія.

13. Результати виконання звітнього етапу відповідно до технічного завдання/календарного плану:

13.1 Заплановані завдання звітнього етапу проєкту (*перерахуйте завдання звітнього етапу, окреслені у запиті (технічному завданні/календарному плані) проєкту*) (до 20 рядків):

1. Числове визначення границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні. Знаходження коефіцієнта максимальної прямої жорсткості ущільнювального шару в залежності від геометрії ущільнення.
2. Числове визначення несучої здатності при великих значеннях радіального зміщення вала в шпаринному ущільненні-опорі на перекачуваному середовищі (воді).
3. Аналітичний розрахунок витратних та динамічних характеристик двох-, та трьохшпаринних ущільнень-опор.
4. Числовий аналіз несучої здатності і динамічної стійкості ущільнень-опор з статогідродинамічним розвантаженням в безпідшипниковому та безвальному насосах.

5. Аналіз антифрикційних матеріалів і покриттів ущільнень-опор, які забезпечують надійну роботу в моменти пуску і зупинення насосного агрегату.

13.2 Отримані результати звітної етапу проєкту (*опишіть отримані результати виконавцями протягом звітної періоду, посилаючись на заплановані та досягнуті цілі, задачі та індикатори виконання, згадані в технічному завданні/календарному плані дослідження. Включіть посилання на публікації у наукових виданнях, інші показники з п. 18, що є підтвердженням досягнення результатів виконання етапу, якщо такі показники передбачені*) (до 70 рядків):

У результаті виконання звітної етапу проєкту встановленні загальні закономірності впливу геометрії конструкцій на несучу здатність, витратні та ротородинамічні характеристики ущільнень-опор за допомогою комп'ютерного моделювання та його перевірки з результатами існуючих експериментальних досліджень. Створені можливості гідростатичного і гідродинамічного змащення ущільнень-опор підвищують несучу здатність та динамічну стійкість ротора при пусках і зупиненнях насосних агрегатів. Утворення поверхневих покриттів на сталевих деталях ущільнень-опор підвищує якісні показники антифрикційних поверхневих шарів та суттєво зменшує вартість використаних матеріалів.

Отримані такі основні результати:

- теоретичні основи розрахунку та моделювання складної спіральної течії в довгих ущільненнях-опорах, що за допомогою числових методів планування експерименту дозволило встановити границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні. Показано, що коефіцієнт прямої жорсткості ущільнювального шару суттєво залежить від співвідношення осьової і окружної швидкостей течії в ущільненні [6-8,15].

- нові наукові результати числового визначення несучої здатності і динамічної стійкості при великих ексцентриситетах вала і втулки ущільнення-опори на перекачуваному рідкому середовищі. Встановлено, що при мінімальному зазорі, за рахунок гідродинамічного ефекту, значно підвищується несуча здатність, але при певному співвідношенні величин геометричних розмірів (довжини, діаметру і зазору) і робочих параметрів (вхідного тиску і швидкості обертання) ущільнення-опори можлива втрата як статичної, так і динамічної стійкості ротора відцентрового насоса. Видані рекомендації по співвідношенням довжини і висоти зазору до діаметру для отримання максимальної несучої здатності і динамічної стійкості ущільнення-опори [6-8,15].

- методика числового розрахунку динамічних характеристик двох-, та трьохшпаринних ущільнень-опор, яка дозволяє враховувати вплив особливостей течії у з'єднувальних камерах. Показано, що статична і динамічна нестійкість ротора в багатошпаринних ущільненнях-опорах пов'язана здебільшого з недостатньою симетричною перехресною окружною течією в з'єднувальних камерах. Отримано вплив коефіцієнту тертя на стінці на окружну течію для різних конструкцій трьохшпаринних ущільнень. Порівняно динамічні коефіцієнти жорсткості і демпфірування та витоки для п'яти різних конструкцій трьохшпаринних ущільнень [7,8,10,15].

- нові наукові результати числового аналізу несучої здатності і роторної динаміки в радіально-осьових ущільненнях-опорах з гідростатичним і гідродинамічним розвантаженням в безпідшипникових відцентрових насосах. З

використанням числових і аналітичних методів розрахунків показано, що динамічні коефіцієнти жорсткості і демпфування спільних радіальних і осьових коливань в залежності від подачі насоса можуть мати як позитивні, так і негативні значення. Це пояснюється взаємним впливом радіальних і осьових коливань вала в циліндричному та торцевому зазорах ущільнення-опори. Отримані гідродинамічні сили та оцінені динамічні коефіцієнти жорсткості і демпфірування в залежності від вхідного тиску і швидкості обертання вала [9,15,16].

- методи електроіскрового легування та нанесення квазибагатошарових антифрикційних покриттів. Показано, що за рахунок застосування мідної основи та спеціальної пастоподібної суміші елементів, до складу якої входять карбід вольфраму і нікель, досягається підвищення зносостійкості і надання необхідної шорсткості сталевих поверхонь тертя, що забезпечує надійну роботу ущільнень-опор в моменти пуску і зупинення насосного агрегату [1-5,11-14].

13.3 Відхилення від календарного плану дослідження (за наявності) *(вказіть та детально обґрунтуйте можливі відхилення від технічного завдання/календарного плану дослідження та їх потенційний вплив на подальше виконання проєкту (до 30 рядків):*

14. Наукова цінність і актуальність отриманих результатів (науково-технічної продукції), їх порівняння з українськими та/або кращими закордонними аналогами (до 30 рядків):

Виконано порівняння несучої здатності, витратних і динамічних характеристик ущільнень-опор з традиційними радіальними і осьовими підшипниками ковзання. Для найкращого розуміння полів тиску, траєкторій течії рідини у зазорах використовувалося моделювання різних типів ущільнень-опор у програмних комплексах обчислювальної гідродинаміки. У результаті виконання розроблені методики розрахунку та моделювання, а також нові конструкції ущільнень-опор. Теоретичні основи розв'язання задачі прецесійного руху вала в зазорі ущільнень-опор та оцінювання динамічних коефіцієнтів жорсткості та демпфування. Методика аналітичного розрахунку двох- та трьохшпаринних ущільнень, заснована на застосуванні теорії інтегральних характеристик потоку. Методика аналізу радіально-осьових коливань зрівноважуючої ущільнювальної системи. Отримані нові наукові результати, пов'язані з числовими розрахунками ущільнень-опор відцентрових машин. Нові наукові дані про механізм гідростатичного, гідродинамічного змащення комбінованих ущільнень-опор. Проведені обчислювальні дослідження дозволяють визначити найбільш перспективні конструкції опорно-ущільнювальних вузлів і перевірити розроблені методики розрахунку. Виконана оптимізація вдосконалених конструкцій ущільнень-опор.

Отримані при виконанні проєкту наукові результати по визначенню несучої здатності і динамічних коефіцієнтів жорсткості і демпфування для опорно-упорних ущільнень-опор з гідростатичним і гідродинамічним розвантаженням можуть бути корисними при створенні нових конструкцій турбомашин з вбудованими підшипниковими опорами, які змащуються перекачуваною рідиною для судових насосів, турбонасосів рідинних ракетних двигунів, так і насосів охолодження реактора АЕС та інших. А врахування результатів аналізу взаємного впливу радіальних і осьових коливань вала в циліндричному та торцевому зазорах дозволить покращити надійність ущільнень-опор на стадії їх проєктування.

Нові конструкції міжступеневих багатошпаринних ущільнень-опор мають кращі ротородинамічні і витратні характеристики в порівнянні з існуючими конструкціями шпаринних та лабіринтних ущільнень, що забезпечує достатню динамічну стійкість вала і зменшення втрат енергії в насосному агрегаті. Нові комбіновані конструкції ущільнень-опор з гідростатичним і гідродинамічним розвантаженням суттєво підвищують несучу здатність, надійність і герметичність насосних агрегатів.

Застосування методів електроіскрового легування та нанесення квазибагатошарових антифрикційних покриттів покращить зносостійкість підшипникових опор для яких змащувальним середовищем є вода.

Методики та алгоритми числового аналізу витратних, трибологічних і ротородинамічних характеристик, які розроблені в процесі роботи над проектом, за своєю складністю співставні з розглянутими в сучасних дослідженнях.

15. Практична цінність результатів для потреб оборони, безпеки, економіки та/або суспільства України (у разі наявності) (до 30 рядків):

Цей проєкт надає нове уявлення про несучу здатність, герметичність та динамічну стійкість роторних систем турбомашин, а також надає суспільству можливості для нових технологічних рішень в галузі насосо- і компресоробудування, турбінобудування, авіа- та ракетобудування. На основі результатів досліджень розроблені нові конструкції надійних і герметичних радіальних і осьових ущільнень-опор. Отримані результати дозволять значно підвищити робочі параметри, герметичність та енергоефективність турбомашин, які застосовуються в машинобудуванні, авіа- ракетно-космічній галузі та транспорті. Підвищиться екологічна та енергетична безпека країни.

Отримані у роботі результати можуть бути використані як прикладні розробки, зокрема нові конструкції одношпаринних та багатошпаринних ущільнень-опор, радіально-осьових ущільнень-опор з гідростатичним і гідродинамічним розвантаженням в безпідшипникових та безвальних відцентрових насосах, і методики їх розрахунку та моделювання. За тематикою, пов'язаною з НДР, виконувався спільний українсько-польський науково-дослідний проєкт. Результати роботи впроваджені у навчальний процес, зокрема при викладанні дисциплін «Обчислювальна гідроаеромеханіка» і «Комп'ютерне моделювання динамічних систем», «Чисельні методи в механіці», та «Трибомеханіка та основи контактної механіки».

16. Основні кількісні показники/індикатори* виконання звітнього етапу **за темою** проєкту (у звіті залишити лише ті показники з таблиці, які планувались у запиті (заявці/договорі на отримання фінансування (надання грантової підтримки)), із зазначенням відповідного фактичного кількісного виконання цих показників/індикаторів. Якщо у запиті (заявці тощо) кількісні показники не планувались, то у звіті можуть зазначатись лише показники у разі їх наявності виконання):

№ з/п	Показники/індикатори	Заплановано (відповідно до запиту на фінансування /ТЗ/КП тощо), кількість	Виконано (за результатами етапу), кількість
1.	Публікація результатів:		
1.1.	Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних: - Scopus та/або Web of Science Core Collection, всього, од. з них із квантилем Q1 і Q2 на момент опублікування, од. з них із квантилем Q3 і Q4 на момент опублікування, од.	5 - -	9 5 4
1.4.	Статті у фахових виданнях України категорії «Б», од.	2	2
1.5.	Статті у періодичних виданнях інших країн, що мають ISSN, од.	-	1
1.6.	Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України та не індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection, од.	-	1
1.8.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) в українських видавництвах, од.	1	1
2.	Презентація та дисемінація результатів:		
2.1.	Міжнародні науково-комунікативні заходи, конференції, од.	-	1
3.	Підготовка наукових кадрів:		
3.1.	Захищено дисертацій доктора наук авторами проєкту або під консультуванням авторів у рамках тематики проєкту, од.	1	-
4.	Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності (ОПІВ)		
4.3.	Отримано патентів України на корисну модель, од.	2	2
4.5.	Інші ОПІВ, які не описані у пп. 4.1-4.4, од.	1	-
5.	Впровадження та використання наукових або науково-технічних (прикладних) результатів:		
5.5.	Впроваджено у освітній процес ЗВО/НУ з відповідним підтвердженням, од.	-	1
7.	Участь з оплатою у виконанні проєкту (штатних одиниць/осіб) згідно з Додатком 1:		
7.1.	Студентів (здобувачів вищої освіти I-II рівнів), шт.од./ осіб	2	2
7.2.	Аспірантів (здобувачів вищої освіти III рівня), шт.од./ осіб	2	2
7.3.	Молодих вчених, шт.од./ осіб	1	1

* - до показників/індикаторів таблиці п. 16 не можуть бути включені будь-які публікації (включно із співавторством), конференції, впровадження, охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності тощо держав (їх представників), визнаних в установленому порядку державою-агресором або державою-окупантом, або держав, що не визнають тимчасово окуповані, починаючи з березня 2014 року, території України такими, що належать Україні.

17. Відхилення від запланованих показників/індикаторів, зазначених у п. 16 (у разі наявності зазначити і обґрунтувати причини таких відхилень та їх вплив на подальше виконання проєкту) (до 20 рядків):

Науковий керівник проєкту Загорулько А.В. готує для подачі до Спецради дисертацію на здобуття доктора технічних наук і планує її захист у 2024 році. Затримка з захистом докторської дисертації не надасть суттєвого впливу на подальше виконання проєкту. Також на наступний рік перенесено отримання авторського права на твір - методичку числового розрахунку статичних і динамічних характеристик опорно-упорного зрівноважуючого пристрою. За іншими індикаторами, показники або повністю виконані, або перевиконані.

18. Вихідні дані щодо показників виконання відповідно до пунктів п. 16 (зазначити дані про публікації, конференції, захисти дисертацій, отримання ОПІВ,

впровадження, створення НТП, залучення молодих вчених, студентів, аспірантів тощо) з додаванням WEB-посилання (за наявності) на ресурси, де вони розміщені:

1. Tarelnyk, V.B., Gaponova, O.P., Tarelnyk, N.V., Myslyvchenko, O.M. Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying (2023) *Progress in Physics of Metals*, 24 (2), pp. 282-318. DOI: 10.15407/ufm.24.02.282
2. Zhang, Z., Konoplianchenko, I., Tarelnyk, V., Liu, G., Du, X., Yu, H. The Characterization of Soft Antifriction Coating on the Tin Bronze by Electrospark Alloying (2023) *Medziagotyra*, 29 (1), pp. 40-47. DOI: 10.5755/j02.ms.30610
3. Zhengchuan, Z., Tarelnyk, V., Konoplianchenko, I., GuanJun, L., Hongyue, W., Xin, D., Yao, J., Zongxi, L. New evaluation method for the characterization of coatings by electroerosive alloying (2023) *Materials Research Express*, 10 (3), 036401. DOI: 10.1088/2053-1591/acc15b
4. Gaponova, O.P., Tarelnyk, V.B., Tarelnyk, N.V., Myslyvchenko, O.M. Nanostructuring of Metallic Surfaces by Electrospark Alloying Method (2023) *JOM*, 75 (9), pp. 3400-3412. DOI: 10.1007/s11837-023-05940-1
5. Zhang Zhengchuan, Tarelnyk, V., Konoplianchenko, I., GuanJun, L., Xin, D., Yao, J. Characterization of Tin Bronze Substrates Coated by Ag + B83 through Electro-Spark Deposition Method (2023) *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 59 (2), pp. 220-230. DOI: 10.3103/S1068375523020187
6. Grzegorz Peczkis, Grzegorz Przybyła, Andrey Zahorulko. Zmiana profilu rynkowej ceny energii elektrycznej w Polsce w okresie intensywnej ekspansji instalacji odnawialnych źródeł energii (2023) *Rynek Energii*, 2023 (4), pp. 3-8. <https://rynek-energii.pl/pl/RE167>
[https://www.cire.pl/filemanager/Materia%C5%82y%20Problemowe%20\(Wies%C5%82aw%20Drozdowski\)%20/705730955f471297ae9089ab8e1b286d2ffb4588481dbc51a8ddb439dfdda983.pdf](https://www.cire.pl/filemanager/Materia%C5%82y%20Problemowe%20(Wies%C5%82aw%20Drozdowski)%20/705730955f471297ae9089ab8e1b286d2ffb4588481dbc51a8ddb439dfdda983.pdf)
7. Zahorulko, A., Pozovnyi, O., Peczkis, G. CFD study of radial and tangential forces in two-annular seals (2023) *Tribology International*, 184, 108449. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108449
8. Zahorulko, A., Pozovnyi, O., Peczkis, G. Experimental and CFD analysis of static and dynamic rotor stabilities in three-annular seals (2023) *Tribology International*, 185, 108566. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108566
9. Tarasevych, Y., Savchenko, I. Numerical Study of Hydrodynamic Characteristics of the Automatic Balancing Device Elements of the Centrifugal Pump (2023) *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 106-114. DOI: 10.1007/978-3-031-32774-2_11
10. A. Zahorulko, O. Pozovnyi, G. Peczkis. Badania numeryczne uszczelnienia dwupierścieniowego, *Pompy Pompownie* 1/2023, pp. 88-98. https://www.kierunekbmp.pl/Resources/magazyn/1_2023_pompy_portal.pdf
11. Сінь, Д., Тарельник, В., Думанчук, М., Івченко, О., Герасименко, В. (2023). Дослідження методів підвищення якості покриття легкоплавкого сплаву Б83, що сформовані методами електроіскрової обробки. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, №3 (53), 3-10. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.1>
12. 3. Майфат, М.М., Тарельник, В.Б., Гапонова, О.П., Радіонов, О.В., Тарельник, Н. В. (2023). Удосконалення технології припрацювання пари тертя «вкладиш підшипника – шийка валу». Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія:

- Механізація та автоматизація виробничих процесів, (1 (51), 53-58.
<https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1.9>
13. Гапонова О.П., Тарельник В.Б., Жиленко Т.І., Тарельник Н.В. Патент на корисну модель № 153741. Спосіб алітування сталевих деталей. 23.08.2023, Бюл. №34.
<https://www.ippt.pan.pl/repository/patenty/UA153740.pdf>
14. Гапонова О.П., Тарельник Н.В., Тарельник В.Б., Жиленко Т.І., Мисливченко О.М., Охріменко В.О., Голуб Н.Р. Патент на корисну модель № 153145. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень (ІТУ), які підлягають радіаційному опромінюванню. 24.05.2023, Бюл. №21.
https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/92686/1/153145_Haponova.pdf
15. Загорулько А.В. Ущільнення та опори турбомашин: монографія / А.В. Загорулько – Суми: Сумський державний університет, 2023. – 250 с.
16. N. Brunetière, A. Zahorulko, J. Bouyer, 2023, "Dynamic behavior of textured impulse seals", 9th International Tribology Conference, 25-30 September, Fukuoka, Japan, Presentation 30-N-05.

До звіту додаються електронні* копії наукових публікацій, охоронних документів, інша наукова продукція (окрім матеріалів, які містять інформацію з обмеженим доступом) **(Додаток 2 до звіту)**.

* - у випадку необхідності надання друкованої версії звіту, до нього додаються друковані додатки (окрім великих (більше 50 стор.) за обсягом монографій, підручників, словників тощо та матеріалів, які містять інформацію з обмеженим доступом).

19. Рішення** вченої (наукової, науково-технічної, технічної) ради або іншого керівного (дорадчого) органу (за відсутності зазначеної ради) організації-виконавця проекту щодо результатів розгляду проміжного звіту:

(стисло зазначити текст висновку ради (органу) про відповідність/невідповідність виконаних за проектом робіт технічному завданню/календарному плану, номер та дату протоколу)

** - зазначається і надається лише у випадку наявності відповідних вимог від замовника/ грантодавача. Також до звіту необхідно додати копію витягу з протоколу засідання відповідної ради (органу) в електронному (друкованому) вигляді **(Додаток 3 до звіту)**.

20. Анотація основних результатів звітнього етапу проекту *(готується українською та англійською мовами (до 30 рядків кожною мовою), у форматі, придатному для розуміння загальною аудиторією (науково-популярним стилем) (Додаток 4 до звіту)*.

Додаток 1 до проміжного звіту

Перелік виконавців проєкту з оплатою праці

№	Прізвище, ім'я, науковий ступінь, вчене звання (особистий підпис, у разі необхідності)	Основне місце роботи або здобуття освіти	Зазначити вік та наявність статусу молодого вченого (на момент подання звіту)	Посада за проєктом (або договір ЦПХ) та роль у проєкті (керівник, відповідальний виконавець, виконавець, студент, аспірант тощо)	Основні завдання у проєкті (стисло зазначити функції)
1	Загорулько Андрій, канд. техн. наук, доц.	Сумський державний університет	51 рік	п.н.с., керівник	<p>Числове визначення границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні.</p> <p>Числове визначення несучої здатності при великих значеннях радіального зміщення вала в шпаринному ущільненні-опорі на перекачуваному середовищі (воді).</p> <p>Числовий розрахунок витратних та динамічних характеристик двох-, та трьохшпаринних ущільнень-опор.</p> <p>Числовий аналіз несучої здатності і динамічної стійкості ущільнень-опор з стагогідродинамічним розвантаженням в безпідшипниковому та безвальному насосах.</p> <p>Аналіз антифрикційних матеріалів і покриттів ущільнень-опор, які забезпечують надійну роботу в моменти пуску і зупинення насосного агрегату.</p>
2	Гудков Сергій, канд. техн. наук, доц.	Сумський державний університет	40 років	с.н.с, відповідальний виконавець	<p>Числове визначення границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні.</p> <p>Числове визначення несучої здатності при великих значеннях радіального зміщення вала в шпаринному ущільненні-опорі на перекачуваному середовищі (воді).</p>
3	Тарельник В'ячеслав, докт. техн. наук, проф.	Сумський національний аграрний університет	71 рік	п.н.с., виконавець	<p>Аналіз антифрикційних матеріалів і покриттів ущільнень-опор, які забезпечують надійну роботу в моменти пуску і зупинення насосного агрегату.</p>
4	Савченко Євген, канд. техн. наук, доц.	Сумський державний університет	64 роки	с.н.с, виконавець	<p>Числовий аналіз несучої здатності і динамічної стійкості ущільнень-опор з стагогідродинамічним розвантаженням в безпідшипниковому та безвальному насосах.</p>

№	Прізвище, ім'я, науковий ступінь, вчене звання (особистий підпис, у разі необхідності)	Основне місце роботи або здобуття освіти	Значити вік та наявність статусу молодого вченого (на момент подання звіту)	Посада за проектом (або договір ЦПХ) та роль у проекті (керівник, відповідальний виконавець, виконавець, студент, аспірант тощо)	Основні завдання у проекті (стисло зазначити функції)
5	Мищенко Світлана	Сумський державний університет	54 роки	м.н.с., виконавець	Числовий аналіз несучої здатності і динамічної стійкості ущільнень-опор з статогідродинамічним розвантаженням в безпідшипниковому та безвальному насосах.
6	Загорулько Юлія	Сумський державний університет	48 років	пров. інж., виконавець	Числове визначення границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні.
7	Позовний Олександр, докт. філософ.	Сумський державний університет	30 років, молодий вчений	с.н.с., виконавець	Числовий розрахунок витратних та динамічних характеристик двох-, та трьохшпаринних ущільнень-опор.
8	Сапожников Ярослав	Сумський державний університет	27 років, молодий вчений	м.н.с., виконавець	Числове визначення границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні.
6	Іземенко Владислав	Сумський державний університет	23 роки, молодий вчений	аспірант	Числове визначення границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні.
10	Борсук Сергій	Сумський державний університет	22 роки, молодий вчений	студент	Числове визначення несучої здатності при великих значеннях радіального зміщення вала в шпаринному ущільненні-опорі на перекачуваному середовищі (воді).
11	Ванжула Артур	Сумський державний університет	22 роки, молодий вчений	студент	Числове визначення несучої здатності при великих значеннях радіального зміщення вала в шпаринному ущільненні-опорі на перекачуваному середовищі (воді).

Додаток 2
до проміжного звіту

Копії наукових публікацій, охоронних документів, іншої друкованої наукової продукції

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ВИТЯГ
з протоколу № 11
засідання наукової ради університету**

від 28 грудня 2023 року

ПРИСУТНІ: 34 з 41 членів наукової ради.

СЛУХАЛИ: Гусака О.Г. – декана факультету технічних систем та енергоефективних технологій, який проінформував про стан виконання науково-дослідної роботи «Підвищення несучої здатності, герметичності та динамічної стійкості роторних систем турбомашин» № ДР 0123U101853 (науковий керівник к.т.н., доц. Загорулько А. В.). Він представив звіт про виконання проєкту, зазначив отримані наукові результати, їх оприлюднення, апробацію та практичну цінність.

ВИСТУПИЛИ: Шкурдода Ю. О. – керівник групи моніторингу якості наукових проєктів, який запропонував вважати науково-дослідну роботу «Підвищення несучої здатності, герметичності та динамічної стійкості роторних систем турбомашин» № ДР 0123U101853 виконаною у повному обсязі, відповідно до вимог технічного завдання та календарного плану.

ГОЛОСУВАЛИ: Одноголосно.

УХВАЛИЛИ: Результати виконання науково-дослідної роботи «Підвищення несучої здатності, герметичності та динамічної стійкості роторних систем турбомашин» № ДР 0123U101853 (науковий керівник к.т.н., доц. Загорулько А. В.) у повному обсязі відповідають умовам договору, вимогам технічного завдання та календарного плану.

Голова наукової ради

Анатолій ЧОРНОУС

Секретар наукової ради

Сергій ХОВАНСЬКИЙ

Додаток 4 до проміжного звіту

Анотація основних результатів звітнього етапу проєкту

Під час виконання НДР були одержані такі нові наукові результати:

1. Теоретичні основи розрахунку та моделювання складної спіральної течії в довгих ущільненнях-опорах, що за допомогою числових методів планування експерименту дозволило встановити границі переходу від переважаючої осьової течії в короткому шпаринному ущільненні до переважаючої спіральної течії в довгому шпаринному ущільненні. Показано, що коефіцієнт прямої жорсткості ущільнювального шару суттєво залежить від співвідношення осьової і окружної швидкостей течії в ущільненні.

2. Числове визначення несучої здатності і динамічної стійкості при великих ексцентриситетах вала і втулки ущільнення-опори на перекачуванному рідкому середовищі. Встановлено, що при мінімальному зазорі, за рахунок гідродинамічного ефекту, значно підвищується несуча здатність, але при певному співвідношенні величин геометричних розмірів (довжини, діаметру і зазору) і робочих параметрів (вхідного тиску і швидкості обертання) ущільнення-опори можлива втрата як статичної, так і динамічної стійкості ротора відцентрового насоса.

3. Методика числового розрахунку динамічних характеристик двох-, та трьохшпаринних ущільнень-опор, яка дозволяє враховувати вплив особливостей течії у з'єднувальних камерах. Показано, що статична і динамічна нестійкість ротора в багатошпаринних ущільненнях-опорах пов'язана здебільшого з недостатньою симетричною перехресною окружною течією в з'єднувальних камерах.

4. Результати числового аналізу несучої здатності і роторної динаміки в радіально-осьових ущільненнях-опорах з гідростатичним і гідродинамічним розвантаженням в безпідшипникових відцентрових насосах. Показано, що динамічні коефіцієнти жорсткості і демпфування спільних радіальних і осьових коливань в залежності від подачі насоса можуть мати як позитивні, так і негативні значення.

5. Методи електроіскрового легування та нанесення квазибагатошарових антифрикційних покриттів. Показано, що за рахунок застосування мідної основи та спеціальної пастоподібної суміші елементів, до складу якої входять карбід вольфраму і нікель, досягається підвищення зносостійкості і надання необхідної шорсткості сталевих поверхонь тертя, що забезпечує надійну роботу ущільнень-опор в моменти пуску і зупинення насосного агрегату.

Отримані у роботі результати можуть бути використані як прикладні розробки, зокрема нові конструкції одношпаринних та багатошпаринних ущільнень-опор, радіально-осьових ущільнень-опор з гідростатичним і гідродинамічним розвантаженням в безпідшипникових та безвальних відцентрових насосах, і методики їх розрахунку та моделювання. За тематикою, пов'язаною з НДР, виконувався спільний українсько-польський науково-дослідний проєкт. Результати роботи впроваджені в освітній процес, зокрема при викладанні дисциплін «Обчислювальна гідроаеромеханіка», «Комп'ютерне моделювання динамічних систем», «Чисельні методи в механіці» та «Трибомеханіка та основи контактної механіки».

За результатами НДР у 2023 р. були опубліковані 12 статей у наукових виданнях, з яких 9 статей у журналах, що індексуються БД Scopus та/або WoS (5 статей у виданнях з квантилем Q1 і Q2), 2 статті у наукових фахових виданнях України, стаття у зарубіжному фаховому виданні, монографія українською мовою. Отримано 2 патенти на корисну модель.

The following new scientific results were obtained during the realization of the SRW:

1. Theoretical bases of calculation and modeling of complex spiral flow in long bearings-seals, which, with the help of numerical design of experiment methods, made it possible to establish the boundaries of the transition from the prevailing axial flow in a short annular seal to the prevailing spiral flow in a long annular seal. It is shown that the coefficient of direct stiffness of the sealing layer significantly depends on the ratio of axial and circumferential flow velocities in the seal.

2. Numerical determination of the bearing capacity and dynamic stability at large eccentricities of the shaft and bushing of the seal-bearing on the pumped liquid medium. It was found that with a minimum clearance, due to the hydrodynamic effect, the load-bearing capacity increases significantly, but with a certain ratio of geometric dimensions (length, diameter and clearance) and operating parameters (input pressure and shaft rotation speed) of the seal-bearing, a loss of both static and dynamic stability of the centrifugal pump rotor is possible.

3. The method of numerical calculation of dynamic characteristics of two- and three-annular seals-bearings, which allows taking into account the influence of flow characteristics in the connecting cavities. It is shown that the static and dynamic instability of the rotor in multi-annular seals-bearings is mostly related to the insufficient symmetrical cross-circular flow in the connecting cavities.

4. Results of numerical analysis of bearing capacity and rotor dynamics in radial-axial seals-bearings with hydrostatic and hydrodynamic unloading in bearingless centrifugal pumps. It is shown that the dynamic coefficients of stiffness and damping of joint radial and axial vibrations, depending on the pump supply, can have both positive and negative values.

5. Methods of electrospark alloying and application of quasi-multilayer antifriction coatings. It is shown that due to the use of a copper base and a special paste-like mixture of elements, which includes tungsten carbide and nickel, it is possible to increase the wear resistance and provide the necessary roughness of the steel friction surfaces, which ensures the reliable operation of the seals-bearings during the start and stop of the pump unit.

The results obtained in the work can be used as applied developments, in particular, new designs of single-annular and multi-annular seals-bearings, radial-axial seals-bearings with hydrostatic and hydrodynamic unloading in bearingless and shaftless centrifugal pumps, and methods of their calculation and modeling. A joint Ukrainian-Polish research project was carried out on topic related to the SRW. The results of the work are implemented in the educational process, in particular, when teaching the disciplines "Computational hydroaeromechanics", "Computer modeling of dynamic systems", "Numerical methods in mechanics" and "Tribomechanics and the basics of contact mechanics".

According to the results of the SRW in 2023, 12 articles were published in scientific editions, of which 9 articles were published in journals indexed by the Scopus and/or WoS

databases (5 articles in editions with quartiles Q1 and Q2), 2 articles in scientific specialized editions of Ukraine, an article in a foreign professional edition, a monograph in Ukrainian. 2 patents for a useful model were obtained.