

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу ШЕВЧЕНКА Сергія Станіславовича «Математичні моделі процесів в системах герметизації відцентрових машин», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – “Математичне моделювання та обчислювальні методи”

### **Актуальність теми/**

Відцентрові установки, до яких відносяться насоси, компресори та вентилятори, є обов'язковим і важливим елементом всіх теплоенергетичних установок, в тому числі атомних електростанцій. Їх ефективність та надійність суттєво впливають на загальні характеристики енергоустановок. Підвищенню ефективності та надійності відцентрових машин має приділятися велика увага. В свою чергу системи герметизації, яким присвячена розглянута дисертація, є складовою всіх цих відцентрових машин, і тому представлена дисертаційна робота Шевченка Сергія Станіславовича є актуальною.

Ефективним засобом при проектуванні новітніх ущільнюючих систем є сучасні САПР, які, в свою чергу, потребують створення відповідних математичних моделей, де для всіх видів ущільнень необхідно забезпечити умови відсутності резонансних коливань ротора. Це вимагає оцінки області стійкості та розробки моделі гідромеханічної системи ротор-ущільнення з метою отримання амплітудних та фазових частотних характеристик і умов динамічної стійкості.

Таким чином, розробка моделей, методів розрахунку і конструювання ущільнювачів як складових герметизуючих систем з метою досягнення компромісу між вимогами щодо герметичності і вібраційної надійності з урахуванням коливальних процесів, є актуальною науково-прикладною проблемою.

Актуальність теми дисертаційної роботи Шевченка Сергія Станіславовича, науково-прикладної проблеми та значимість і перспективність отриманих результатів підтверджується також тим, що робота виконувалася згідно цільової програми НАН України, а також у відповідності з рядом науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, у виконанні яких приймав участь здобувач та дані про які наведені в дисертації.

### **Структура та зміст дисертації.**

Дисертацію викладено на 407 сторінках. Робота складається зі вступу, основного змісту, що включає шість розділів, висновків, списку використаних джерел з 182 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг основної частини 341 сторінка.

**У першому розділі** розглянуті проблеми і принципи існуючих підходів

до моделювання та розрахунку ущільнюючих пристроїв відцентрових машин. Сформовані основні принципи побудови моделей ущільнень:

- моделі сальникових і торцових механічних для розуміння механізмів герметизації і подальшого аналітичного дослідження;
- моделі ущільнення з саморегульованим моментом в парі тертя;
- моделі імпульсного торцового ущільнення, як системи автоматичного регулювання; моделі жорсткого ротора з автоматичним урівноважуючим пристроєм служить для подальшого аналізу вимушених коливань ротора;
- моделі динамічної системи «ротор – щілинні ущільнення» та подальшого математичного аналізу динаміки системи з метою врахування при виборі конструкцій щілинних ущільнень не тільки об'ємні втрати, але й забезпечувати необхідні вібраційні характеристики ротора.

Обґрунтовано необхідність проведення досліджень в напрямку розроблення моделей герметизуючих систем відцентрових машин і модельного конструювання ущільнювальних систем з врахуванням особливостей їх впливу на вібраційний стан роторних машин, а також проведено аналіз робіт, пов'язаних з темою наукового дослідження. Сформульовано мету та наукову проблему дослідження.

У другому розділі обґрунтовано напрямки проведення досліджень. Описується класифікація конструкцій ущільнюючих систем роторних машин, виконано побудову фізичних та математичних моделей контактних ущільнень, отримано аналітичні залежності для розрахунку контактних ущільнень. Сформовано систему класифікації ущільнень, виділено об'єкти для досліджень. Вказано, що створення та вивчення моделей кожного типу ущільнень, дає можливість формувати складні ущільнюючі системи з елементів, регулювати взаємовплив між елементами.

Розроблено модель механізму герметизації сальникового ущільнення, як поєднання двох послідовно розташованих гідравлічних ущільнень – передвключеного ущільнення, аналогічного щілинному дроселю, і контактного ущільнення, де відбувається безпосередня герметизація вала. Запропоновано метод розрахунку напруженого стану набивки шляхом вирішення задачі гідропружності.

Розроблено структурну схему моделі торцового механічного ущільнення як динамічної системи, яка дає уявлення про взаємодію основних її елементів. Математична модель ущільнення ґрунтується на спільному вирішенні системи диференціальних рівнянь руху робочого тіла, нерозривності течії, стану і енергії.

Запропоновано методи розрахунку навантажень в парі тертя торцового ущільнення, витрати ущільнюваної рідини, втрат потужності на тертя в торцовій парі, а також деформацій кілець ущільнень. Це дозволяє враховувати експлуатаційні фактори, що впливають на роботу ущільнення, на етапі його проектування.

Розроблені модель та методика розрахунку контактних ущільнень з системами автоматичного регулювання. Побудовано статичні

характеристики саморегульованих ущільнень, отримано аналітичні залежності для розрахунку втрат потужності на тертя в контакті та теплового розрахунку. Вказано, що принцип саморегулювання запатентовано автором.

У третьому розділі розглядаються принцип роботи та призначення щілинних ущільнень і їх вплив на динаміку ротора відцентрової машини.

Щілинні ущільнення розглядаються як гідростатодинамічні опори, здатні ефективно демпфувати коливання ротора. Для визначення динамічних характеристик розглянута модель системи «ротор – щілинні ущільнення».

Проведено оцінку радіальних сил і моментів в щілинних ущільненнях. При виведенні рівнянь радіально-кутових коливань ротора враховано додаткові моменти від пружних сил.

Отримані вирази спільних радіально-кутових коливань ротора в щілинних ущільненнях. З системи неоднорідних алгебраїчних рівнянь отримано амплітуди і фази, виражені через зовнішні збурення. Також отримано умови динамічної стійкості ротора в ущільненнях.

На основі проведених розрахунків динамічних характеристик ротора розроблена методика підвищення вібраційної стійкості відцентрових машин за рахунок зміни конструктивних параметрів щілинних ущільнень.

У четвертому розділі розглядається моделювання гідродинамічних процесів в імпульсних торцевих ущільненнях.

Розглянуто принцип функціонування та побудовано розрахункову модель імпульсного торцевого ущільнення.

Досліджено статичні характеристики імпульсного ущільнення. Зроблено висновки про вплив коефіцієнта навантаження і зусилля попереднього стиснення пружин на статичні характеристики імпульсного ущільнення. Статичний розрахунок дозволяє визначити коефіцієнт гідростатичної жорсткості, умови статичної стійкості, діапазон допустимих ущільнюваних тисків.

Отримано динамічні характеристики імпульсного ущільнення, які містять оцінку власної частоти коливань аксіально-рухомого кільця. Визначено фактори, що впливають на динамічні характеристики ущільнення. Проведено оцінку розмірних значень амплітуд вимушених осьових коливань кільця на будь-якій частоті обертання. Отримані вирази амплітудних і фазових частотних характеристик, що дозволяють виявити небезпечні області частот обертання і підібрати параметри ущільнення так, щоб амплітуди вимушених осьових коливань не виходили за межі динамічної стійкості. Проведено аналіз динамічної стійкості імпульсного ущільнення.

Запропоновано методику аналітичного розрахунку імпульсних торцевих ущільнень, яка дозволяє з достатньою для практики точністю розраховувати їх геометрію на етапі проектування. Визначення основних параметрів імпульсних ущільнень забезпечує оптимальне значення торцевого зазору, відповідну величину витоків та втрат потужності в парі тертя в широкому діапазоні ущільнюваних тисків і частот обертання ротора.



В п'ятому розділі дисертації розглядаються питання моделювання гідродинамічних процесів у щільних ущільненнях систем авторозвантаження та безвальних насосів.

Здійснено моделювання системи «ротор – автоматичний врівноважуючий пристрій». Запропоновано модель і розрахункову схему врівноважуючого пристрою ротора багатоступеневої відцентрової машини, який виконує функції гідравлічного затвора і радіально-осьового підшипника.

Проведений аналіз динаміки системи. Отримано рівняння спільних радіально-осьових коливань ротора відцентрового насоса з системою автоматичного розвантаження. Отримано формули для побудови амплітудних і фазових частотних характеристик, а також розрахунку межі стійкості.

Розроблено методику моделювання ущільнень-опор і безвальних насосів. Безвальні насоси є прикладом використання щільних ущільнень як опор. Проведено аналіз динаміки безвального консольного насоса з комбінованим опорно-врівноважуючим і ущільнюючим вузлом, результати якого засвідчили, що насос має достатній запас вібронадійності.

В шостому розділі дисертації розглядаються питання модельної організації створення ущільнюючих комплексів.

Наведено приклади моделювання складних ущільнюючих систем роторних машин з високими параметрами. Продемонстрована практична реалізація методів створення ущільнюючих систем відцентрових компресорів, авіа та ракетних двигунів та інших роторних машин з високими параметрами.

На основі проведених досліджень та аналізу принципів формування складних ущільнюючих систем розроблено науково обґрунтовану методику їхнього створення. Отримані наукові результати та рекомендації дозволяють ціленаправлено впливати на формування характеристик ущільнюючих систем, чим досягається максимальна гармонізація між герметизацією та вібраційною надійністю.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Наукові положення, висновки дисертаційної роботи в цілому достатньо обґрунтовані. Для обґрунтування наукових положень автором застосовано методи математичного моделювання, прикладна теорія систем, обчислювальні методи алгебри, методи розв'язання нелінійних систем алгебри, трибомеханіки, теплопередачі, теорії пружності, гідрогазодинаміки, теорії коливань, гідроаеропружності, теорії оптимізації гідромеханічних систем та теорії функцій комплексних змінних – для дослідження режимів роботи гідромеханічних систем, які моделюють режими роботи ущільнюючих систем. Проведені чисельне моделювання та експериментальні дослідження розроблених моделей, методів конструювання і засобів автоматизації ущільнюючих систем, оцінка адекватності моделей.

Наукові положення і висновки дисертаційної роботи підтверджені шляхом зіставлення з експериментальними даними для різних типів ущільнюючих систем.

В цілому наукові положення і висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими як теоретично, так і практичним застосуванням.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується по перше, коректністю постановки математичних задач з урахуванням відповідних обмежень, та використанням сучасних математичних методів. По друге, відповідністю пропонованих математичних моделей ущільнюючих систем фізичній суті процесів в досліджуваних об'єктах. Достовірність отриманих результатів та рекомендацій забезпечується коректністю математичного опису гідродинамічних процесів в ущільненнях та системах ущільнень і припущень, що враховують особливості процесів витрат рідини через ущільнювачі, та підтверджується близькістю теоретичних та експериментальних значень витрат герметизованої рідини та амплітудних і фазових характеристик коливань ротора. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у провідних фахових журналах, 5 з яких індексуються в наукометричній базі Scopus рівня квартилей Q1 та Q3.

Також результати підтверджено їх практичним використанням.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

У процесі вирішення визначених завдань у роботі отримано такі наукові результати:

Побудовано моделі контактних і безконтактних ущільнень, в яких, на відміну від відомих рішень, вперше враховано вплив гідродинамічних характеристик герметизуючих пристроїв на динаміку ротора відцентрової машини і отримано аналітичні залежності, які враховують вплив процесів, що відбуваються в ущільнюваному середовищі, в тому числі:

- контактних сальникових ущільнень, де, на відміну від відомих рішень, вперше враховані передвключена безконтактна і контактна ділянки, що дозволяє описати повний цикл функціонування, включаючи пусковий, базовий режими та зупинку відцентрової машини, на відміну від відомих моделей, де аналізується тільки базовий режим, що дозволяє цілеспрямовано впливати на характеристики ущільнень при проектуванні;

- контактних торцових ущільнень, де вперше враховано вплив гідродинамічних процесів, що відбуваються в ущільнюваному середовищі, і його взаємодію з елементами ущільнень, та, на відміну від відомих моделей, забезпечено аналіз ряду процесів при переході торцового ущільнення від стадії спокою до виходу на режим номінальної частоти обертання і навпаки, тобто від сухого до рідинного тертя, з визначенням умов виникнення рідинного тертя;

- безконтактних щілинних ущільнень, в яких вперше враховано

вплив гідродинамічних характеристик ущільнень на динаміку ротора та отримано амплітудні і фазові характеристики з оцінкою межі динамічної стійкості системи;

– імпульсних ущільнень, для яких вперше отримані амплітудні і фазові характеристики та межа стійкості, що дозволяє налаштовувати ущільнення на роботу у вібраційно безпечному режимі.

Для нового класу контактних ущільнень, заснованих на принципі саморегулювання, вперше побудовано модель гідромеханічних і теплових процесів в них та отримано аналітичні залежності для розрахунку характеристик ущільнень з системою саморегулювання.

Вперше отримано моделі, що описують гідродинамічні процеси в імпульсних ущільненнях як системі автоматичного регулювання торцевого зазору і протікання. На їх основі: для розмірів торцевого зазору і витрат ущільнюваного середовища отримано залежності від ущільнюваного тиску, частоти обертання ротора, коефіцієнта навантаження і зусилля попереднього стиснення пружин; визначено коефіцієнт гідростатичної жорсткості, умову статичної стійкості, діапазон допустимих ущільнюваних тисків; вирази для визначення власної частоти коливань аксіально-рухомого кільця; побудовано амплітудні і фазові частотні характеристики вимушених осьових коливань кільця під дією ущільнюваного тиску, що гармонічно змінюється, виконано аналіз динамічної стійкості.

Вперше запропоновано модель систем «ротор – ущільнення» – математичну модель гідродинамічних процесів в щілинних ущільненнях з урахуванням їх впливу на динаміку ротора. Визначено їх динамічні характеристики з урахуванням конструктивних параметрів герметизуючих пристроїв. Розроблено підхід та алгоритм розрахунку динамічних характеристик роторів, що дозволяє по амплітудним і фазовим частотним характеристикам визначати межі динамічної стійкості.

Запропоновано модель системи «ротор – система авторозвантаження», що виконує функції врівноваження сил, які діють на ротор, та одночасно функції кінцевого ущільнення з регульованими протіканнями. Комплексно така задача розглядається вперше. В моделі вперше дано опис осьових сил, що діють на ротор, через частоту обертання ротора. Визначено статичні та динамічні характеристики системи. Для рівнянь нестационарної течії в дроселюючих каналах вперше враховано як активний, так і інерційний опори та встановлено, що інерційний опір рідини в дроселюючих каналах врівноважуючих пристроїв надає демпфуючий вплив, суттєво (порядку на 50%) зменшуючи амплітуди резонансних коливань.

Отримала подальший розвиток теорія математичного моделювання гідродинамічних процесів в ущільненнях відцентрових машин на основі розробки моделей контактних та безконтактних ущільнень, систем ущільнень, систем «ротор – ущільнення» та «ротор – система авторозвантаження».

**Значущість отриманих результатів для науки і практичного**



### **використання.**

Значущість отриманих результатів для науки полягає у розвитку наукового напрямку, спрямованого на вдосконалення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання, обчислювальних методів, призначених для використання при всебічному дослідженні і створенні ущільнюючих систем, розбудові нових теоретичних положень щодо математичного моделювання процесів складних динамічних об'єктів, що визначається в створенні комплексу нових математичних моделей контактних та безконтактних ущільнень, систем ущільнень, систем «ротор – ущільнення» та «ротор – система авторозвантаження».

Значущість результатів дисертаційного дослідження для практики полягає у тому, що розроблений в дисертаційній роботі комплекс математичних моделей дозволяє в перспективі створити методичне, алгоритмічне та програмне забезпечення для розробки та проектування ущільнюючих систем з врахуванням їх впливу на динаміку відцентрових машин.

Висновки і рекомендації, сформульовані у докторській дисертації, мають світове значення.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Отримані теоретичні результати використовуються при проектуванні, виробництві та обслуговуванні відцентрових машин, що документально підтверджується актами впровадження (акти впровадження: АТ «Енергопроект» №99/02 від 15.06.2021, АТ Сумський завод «Енергомаш» №8 від 03.06.2021, Конструкторське бюро «Укрспецмаш» №195 від 07.06.2021, ТОВ «Спецпромтранстехніка» №1/0206 від 02.06.2021, Одеський національний політехнічний університет №21 від 09.08.2021, Навчально – тренувальний центр ВП ЗАЕС №18 від 21.07.2021). Отримані результати впроваджено в конструкторських, виробничих підприємствах, навчальних центрах та закладах вищої освіти. Математичні моделі у вигляді аналітичних залежностей використовуються в системах автоматизованого проектування.

### **Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах.**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 40 працях, з яких: 4 монографії, 22 статті в фахових наукових журналах (в тому числі 5 із них у міжнародних наукометричних базах Scopus), 11 доповідях та тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій та відображені в 3 патентах на винахід.

В опублікованих працях в фахових наукових виданнях повністю викладено основні наукові положення дисертаційної роботи та отримані результати.

Випадків плагіату в наукових статтях та дисертації не виявлено. В монографіях автора використовуються матеріали опублікованих статей, на які є посилання. На ідеї та наукові результати інших авторів, що використані в дисертації, є відповідні посилання та вони не використані в наведених

наукових результатах, які належать виключно автору. В дисертаційній роботі використано значну кількість літературних джерел для класу технічних об'єктів, що розглядаються, на які наявні посилання в дисертації.

Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях достатньо підтверджено матеріалами роботи.

Рівень та кількість публікацій відповідають вимогам, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

**Реферат** ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає актуальність, мету та задачі, основні наукові положення, практичну значущість, апробацію дисертації, її зміст по розділах та висновки. Дисертаційна робота та реферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

**Зауваження та дискусійні питання стосовно положень докторської дисертації.**

1. На стор. 4. вказується «Створення моделей ущільнень з урахуванням гідродинаміки тривимірних нестационарних течій в'язкої рідини в кільцевих каналах, стінки яких обертаються, прецесують і одночасно здійснюють радіально-кутові коливання є актуальною науковою проблемою», але в роботі не представлені моделі ущільнень в тривимірній постановці.

2. У висновку до 1-го розділу (стор. 63) вказується «Методи моделювання і комп'ютерні технології побудови складних ущільнюючих систем є важливою складовою інструментальних засобів для її вирішення». Не зрозуміло чого «її». Тільки після деякого часу становиться зрозуміло, що мова йде про наукову проблему.

3. Формулювання мети дослідження на стор. 31, 32 та 380 не співпадають.

4. На стор. 40 вказано «... рідке або газоподібне середовище, яке знаходиться під великим (до 50-100 МПа) тиском ...». Викликає сумнів наявність технічних систем з таким надвеликим тиском. Бажано навести приклад.

5. Відсутнє обґрунтування коректності використання окремого випадку диференційного рівняння змащення в формі залежності, наведеній на стор. 88, а також залежностей (2.40) та (2.41).

6. Стор. 126. «На рис. 3.2 показана розрахункова модель щільного ущільнення ...», але на рис. 3.2. зображена розрахункова схема.

7. В анотації та висновках вказується про необхідність «забезпечення гармонізації між герметичністю та вібраційною надійністю для використання при конструюванні відцентрових машин». З цього витікає, що має бути запропонована чи вирішена задача оптимізації параметрів для досягнення критерію оптимізації, який має вмещувати характеристики герметичності та вібраційної надійності. Такого критерія на жаль в роботі не запропоновано. Бажано привести пояснення, що мається на увазі під «гармонізацією» та чи



досягнута вона для якихось прикладів в роботі.

8. В роботі наявні некоректні терміни та висловлювання, а саме: мікроучастки; для режима; в околиці; представляють собою; для герметичності ущільнення торцовий зазор на стоянці повинен дорівнювати нулю; торцовий зазор дорівнює нулю; розрахункова модель динаміки ущільнень.

9. Зауваження по оформленню дисертації. За вимогами до докторських дисертацій її об'єм має складати до 300 сторінок основного тексту. Бажано було відмітити, який об'єм приходить на малюнки та таблиці.

Наявні помилки та описки:

- стор. 4 «Врівноважуючи пристрої», треба «врівноважуючі ...»;
- стор. 142 «Умова, при якому», замість «умова, при якій»;
- стор. 364 – «збільшаться», замість збільшаться.
- стор. 374 – «кожної ступені» треба «кожного ступеня».

Не зважаючи на вказані зауваження, в цілому дисертація загалом безсумнівно заслуговує на позитивну оцінку.

### **Загальні висновки.**

Вважаю, що дисертаційна робота ШЕВЧЕНКА Сергія Станіславовича на тему «Математичні моделі процесів в системах герметизації відцентрових машин» є завершеною науковою працею, у якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що забезпечують досягнення мети досліджень та вирішують у сукупності науково-прикладну проблему розробки моделей, методів розрахунку і конструювання ущільнювачів як складових герметизуючих систем з урахуванням коливальних процесів. Дисертація відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи, зокрема, формулі спеціальності та пп. 1 і 4 напрямів дослідження.

Дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її автор - ШЕВЧЕНКО Сергій Станіславович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

### **ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:**

Завідувач кафедри атомних електростанцій

Національного університету «Одеська політехніка»

професор, доктор технічних наук

 Володимир КРАВЧЕНКО

Підпис В. Кравченка підтверджую

Вчений секретар Вченої Ради Національного університету «Одеська політехніка», доктор філософських наук,

доцент

 Лада ПРОКОПОВИЧ