

## ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук Лугової Світлани Олегівни  
на дисертаційну роботу **Баги Вадима Миколайовича**

### **«УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ЛАБІРИНТНИХ УЩІЛЬНЕНЬ ВАЛІВ ПНЕВМОАГРЕГАТИВ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ»,**

що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

#### Актуальність теми.

Широкий спектр використання пневмоагрегатів пред'являє до них все більш високі вимоги, які стосуються в першу чергу підвищення тиску нагнітання та частоти обертання, що є причиною наявності більш важких умов їх роботи. З іншого боку є вимоги до підвищення економічної роботи пневмоагрегатів. Це напряму пов'язано зі зменшенням внутрішніх та зовнішніх перетікань. В якості кінцевих та внутрішніх ущільнень в пневмоагрегатах широко застосовуються безконтактні лабіринтні ущільнення. Основною причиною їхнього широкого застосування в першу чергу є простота конструкції та низька вартість. Крім того, лабіринтні ущільнення можуть застосовуватися при любых швидкостях та при високих температурах.

Ущільнюючий ефект в лабіринтних ущільненнях створюється за рахунок виникнення гідравлічного опору при течії газу через малий зазор. Складний механізм течії в лабіринтних ущільненнях до цього часу є мало вивченим і строга теорія відсутня, тому для практичних розрахунків використовується наближена формула Стодоли, яка доповнена емпіричними коефіцієнтами, що враховують тип ущільнення, розміри камер, форму гребенів, тощо. Багатолітня практика показує непридатність розрахункових методик, які ґрунтуються на теоретичних рішеннях рівнянь течії без урахування впливу реальної форми зазорів, впливу зовнішньої течії у проточній частині на формування граничних умов, та інших факторів. Також слід відмітити, що лабіринтні ущільнення мають суттєвий вплив на течію в бокових пазухах, що в свою чергу обумовлює величину осьової сили, втрат на внутрішнє тертя. При проектуванні турбомашин реальне оцінювання величини осьової сили є запорукою надійності роботи машини.

З огляду на вищесказане, дисертаційна робота Баги В.М., виконана з метою удосконалення методів розрахунку і проектування лабіринтних ущільнень, є актуальною і присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі.

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

Достовірність та обґрунтованість наукових положень дисертаційної роботи обумовлена наступним:

– використанням фундаментальних положень механіки рідини і газу, теорії турбомашин, за допомогою яких побудовані математичні моделі робочого процесу;

– коректною постановкою та застосуванням результатів чисельного експерименту з розрахунку просторової течії в лабіринтному ущільненні;

– експериментальні дані отримані здобувачем на універсальному стенді, який виконаний відповідно до діючих стандартів і за науково обґрунтованою методикою; для вимірювання фізичних величин використовувалися відповідні прилади; виконаний розрахунок відносної похибки при визначенні масової витрати через ущільнення, яка складає 1,8% при вимірюванні об'ємної витрати лічильником РГ-40, та 4,7% при вимірюванні лічильником РГ-250.

– висновки і рекомендації засновані на детальному аналізі чисельних результатів отриманих здобувачем і перевірені шляхом порівняння розрахункових даних з даними експериментальних досліджень.

У процесі виконання дисертаційної роботи здобувачем отримано **нові результати**, які доповнюють теорію робочого процесу та практику конструювання безконтактних ущільнень, а саме:

– уперше запропонований поелементний підхід до розглядання робочого процесу в лабіринтному ущільненні, який дозволив уточнити фізичну картину процесів, які мають місце в лабіринтному ущільненні, виявити наявність аномальних явищ у вигляді флуктуацій, тобто одночасно існуючих зон з різними режимами вихрової течії, визначити елементи і фактори, які в більшій мірі впливають на ефективність ущільнення і уточнити математичну модель течії;

– уперше отримані критеріальні рівняння і графічні залежності впливу різних параметрів на характеристики ущільнення, уточнена методика розрахунку ущільнення з урахуванням факторів (обертання вала, масштабний фактор, та ін.), які раніше не враховувалися, отримані коефіцієнти окремих видів втрат методом ідентифікації математичної моделі ущільнення;

- уперше проведений порівняльний аналіз впливу властивостей газів, у тому числі з використанням експериментальних даних, отриманих на водяній парі і повітрі;
- отриманий ряд нових і уточнені відомі дані по вибору геометричних параметрів лабіринтних ущільнень, обґрунтована необхідність підвищення геометричного об'єму розширювальних камер по ходу течії.

Отримані результати дійсно є новими для теорії робочого процесу та практики конструювання безконтактних ущільнень.

#### **Практичне значення.**

Отримані в розглянутій дисертаційній роботі результати є практично значимими, в частині:

- розробки методики поелементного розрахунку гідравлічних втрат в проточній частині лабіринтного ущільнення, яка дозволяє створити найбільш ефективну конструкцію ущільнення пневмоагрегата;
- отримання експериментальним шляхом критеріальної залежності умовного коефіцієнта витрати лабіринтного ущільнення від чисел Рейнольдса та Ейлера, що дозволяє більш ефективно використовувати метод моделювання при проектуванні вузлів ущільнень;
- розробки алгоритму і методики проектування лабіринтних ущільнень пневмоагрегатів, що дозволяє прискорити процес їх розрахунку і проектування, при цьому точність визначення характеристик ущільнення підвищується на 10÷25%;
- розробки практичних рекомендацій для вибору раціональної геометрії, вказані діапазони оптимальних значень  $t$  і  $h$ , запропонованої конструкції із перемінними значеннями параметрів  $t$  і  $h$ , що дозволяє знизити величину витрати на 30%.

Основні результати дисертаційної роботи були впроваджені для використання при виконанні курсових і дипломних проектів, бакалаврських та магістерських робіт, впроваджені у навчальні курси «Пневмоагрегати і вакуумна техніка», «Турбокомпресори», «Проектування турбомашин», що викладаються для студентів спеціальності 05060405 «Компресори, пневмоагрегати і вакуумна техніка» Сумського державного університету (м. Суми).

#### **Повнота викладу в опублікованих працях.**

Апробація результатів роботи здійснена досить широко у ряді науково-технічних конференцій різного рівня, в тому числі й міжнародних конференціях. Матеріали дисертації опубліковані у 6 статтях, 5 із яких опубліковані у фахових

виданнях з переліку, затвердженому Міністерством освіти і науки України, 1 – у зарубіжному виданні, що входить до наукометричної бази Scopus.

### **Оцінка змісту дисертації та автореферату.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 166 сторінок, в тому числі 71 рисунок і 26 таблиць по тексту, 3 додатки на 3 сторінках, список використаних джерел інформації з 108 найменувань на 9 сторінках.

У додатках представлені акти впровадження основних результатів роботи на промислових підприємствах України, та у навчальному процесі СумДУ.

**У вступі** обґрунтована актуальність проведеного дослідження, викладена наукова новизна і практична цінність представленої роботи. Структура представлення основних положень проведеного дослідження у вступі відповідає встановленим вимогам.

**У першому розділі** викладені результати інформаційно-аналітичного огляду роботи безконтактних ущільнень. Проведений огляд різних типів ущільнень, що застосовуються у сучасних пневмоагрегатах, та визначені їх основні переваги і недоліки. Окремо розглянуті різні типи лабіринтних ущільнень.

У розділі виконаний порівняльний аналіз існуючих методів розрахунку лабіринтних ущільнень, які були у свій час розроблені А. Стодолою, С.О. Чаплигінім, Б.М. Трояновським, і отримали подальший розвиток у роботах В.А. Марцинковського, А.Г. Костюка, В.Г. Орлика, та ін. Показано, що у більшості випадках для визначення величини витрати через ущільнення використовується формула А. Стодоли, доповнена емпіричним коефіцієнтом, який враховує ті чи інші властивості і отриманий за результатами експериментальних досліджень. Широко розглянуто вплив конструктивних параметрів (величини радіального зазору, висоти гребенів, величини відстані між двома сусідніми гребенями, та ін.) на роботу лабіринтних ущільнень.

Аналітичний огляд наданої в наукових виданнях інформації є достатньо повним і глибоким. В результаті інформаційно-аналітичного огляду була сформульована мета дослідження, та задачі для її досягнення.

**Другий розділ** присвячений аналізу і обґрунтуванню методик дослідження роботи лабіринтних ущільнень.

У першому підрозділі проведений аналіз існуючих проблем при моделюванні процесів, які мають місце при роботі лабіринтних ущільнень.

Обґрунтована необхідність проведення більш детального експериментального та теоретичного дослідження цих процесів.

У другому підрозділі наведений опис чисельного дослідження за допомогою програмного продукту FlowVision. Надані загальні характеристики програмного продукту, який використовувався, а також обґрунтовано особливості розрахункової моделі, що була прийнята для даного конкретного дослідження.

У третьому підрозділі наведений опис експериментального дослідження. Надані схеми та характеристики експериментальних установок, наведена методика проведення експериментальних досліджень та визначені величини відносних похибок вимірювання параметрів. Слід відмітити, що автором створений універсальний експериментальний стенд, який дозволяє проводити дослідження роботи лабіринтних ущільнень в умовах, максимально наближених до робочих умов. Створена можливість змінювати робочу частину ущільнень в широкому діапазоні діаметрів та радіальних зазорів, встановлювати ексцентриситет. Конструкція стенда дозволяє проводити дослідження при різних значеннях частоти обертання вала, та змінювати робоче середовище. У відповідності до поставлених задач надана програма експериментальних досліджень.

У третьому розділі наведені результати розрахунково-теоретичного дослідження робочого процесу в лабіринтних ущільненнях.

У першому підрозділі за допомогою чисельного дослідження показано, що обмеження і припущення, які покладені в основу теорії А. Стодоли, не відповідають реально існуючій картині течії в лабіринтному ущільненні.

Другий підрозділ присвячений поглибленому вивченню робочого процесу, який має місце в лабіринтному ущільненні з гладким валом. Для отримання знання про реальні процеси, які протікають в ущільненні, був застосований метод поелементного дослідження ущільнення, який полягав у тому, що на основі вимірюваних значень статичного тиску в камерах ущільнення, нехтуючи зміною температури, були розраховані значення місцевих коефіцієнтів витрати для кожної щілини, визначалися їх середні значення і порівнювалися з інтегральними.

За допомогою чисельного дослідження течії в проточній частині лабіринтного ущільнення було встановлено нерівномірний розподіл тиску по гребеням ущільнення, який у свою чергу призводить до різних значень коефіцієнтів витрати для різних гребенів.

У третьому підрозділі описана методика отримання експериментальної залежності витрати повітря через лабіринтне ущільнення від основних факторів (величини радіального зазору, обертання вала та перепаду тиску) за допомогою

планування експерименту. Зазначено, що фактор обертання валу має менший вплив на величину витрати ніж два інших фактори.

У четвертому і п'ятому підрозділах запропонована модель умовного коефіцієнта витрати ущільнення, яка базується на представленні гідравлічного опору лабіринтного ущільнення як суми місцевих опорів, які описуються аналітичними виразами, та вирішена задача ідентифікації математичної моделі умовного коефіцієнта витрати лабіринтного ущільнення з гладким валом за результатами експериментального дослідження.

У четвертому розділі наведені результати чисельного та експериментального досліджень течії і характеристик в лабіринтному ущільненні.

За допомогою чисельного та експериментального досліджень отримані дані про вплив на витратні характеристики ущільнення наступних факторів: частоти обертання валу, масштабного фактора, ексцентриситету, фізичних властивостей газів, конструктивного виконання ущільнення.

У першому підрозділі наведені результати, які показують вплив на структуру течії і коефіцієнт втрат в ущільненні режимних параметрів – частоти обертання вала і перепаду тиску. Показано, що при значному підвищенні режимних параметрів вплив частоти обертання вала складає близько 15%, і нехтувати цим впливом неможна.

У другому підрозділі розглянуто вплив геометричних факторів, а саме: радіального зазору, висоти гребенів, шага гребенів, ексцентриситету, та інших.

У третьому підрозділі наведені результати моделювання лабіринтних ущільнень різних конструктивних схем. Особливу увагу приділено дослідженню конструкції лабіринтного ущільнення зі змінним шагом. Отриманий результат показує, що величина коефіцієнта втрат ущільнення зі змінним шагом нижча в порівнянні з базовим на 30% для ущільнення з діаметром 240 мм, і на 17% для ущільнення з діаметром 80 мм.

У четвертому підрозділі розглянуті результати досліджень, які показують вплив властивостей реальних газів на характеристики ущільнення. Аналіз експериментальних досліджень ущільнення при роботі на повітрі та на водяній парі показав розходження за величиною коефіцієнта втрат, що становлять 30%. Також наведені результати чисельних досліджень, в яких в якості робочої речовини використовувалися гази з різними фізичними властивостями. Отримані результати свідчать про значну залежність коефіцієнта втрат від фізичних властивостей газів.

У п'ятому підрозділі надані практичні рекомендації що до розрахунку та проектування лабіринтних ущільнень.

Завершенням розділу є проведення модернізації думісного та міжступеневих ущільнень покривних дисків відцентрового компресора, за результатами якої автором вдалося суттєво удосконалити лабіринтні ущільнення.

**Висновки по роботі.** У роботі надано вісім висновків, які узагальнюють висновки по розділах і підсумовують результати дослідження в цілому. Усі вони у логічному порядку вказують на основні результати дослідження, відображають творчий шлях здобувача і його успіхи у науковому пізнанні робочого процесу в лабіринтному ущільненні на основі експериментального та чисельного дослідження течії рідини. За обсягом і структурою представлена дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам.

Структура подання матеріалу в авторефераті відповідає встановленим вимогам. Основні положення дисертації викладені в авторефераті логічно, послідовно і ясно. Зміст автореферату об'єктивно відображає основні положення дисертації, розбіжностей між суттю дисертації і автореферату не виявлено.

### **Зауваження по роботі**

1. У вступі, при наданні загальної характеристики дисертації, повинні бути сформульовані мета і задачі дослідження.
2. У трьох розділах дисертаційної роботи перекликаються результати чисельного та експериментального досліджень, тому іноді важко встановити належність того чи іншого результату конкретному виду дослідження.
3. У тексті дисертації не наведено обґрунтування застосування моделі повністю стискаемого середовища.
4. У третьому розділі проведений аналіз місцевих коефіцієнтів втрат для лабіринтного ущільнення з кількістю гребенів  $z=15$ . Показано, що розподіл величини коефіцієнта втрат має нерівномірний характер, відмічено наявність хвильових процесів, та зроблена спроба зіставити наявність цих коливань зі структурою течії в розширювальній камері. Дані результати отримані за допомогою розрахункових досліджень із використанням обраної автором розрахункової моделі. У такому разі, при обґрунтуванні розрахункової моделі, доцільно було б навести порівняльні картини течії, отримані при використанні, наприклад, різних моделей турбулентності.
5. У третьому розділі проводиться порівняння результатів розрахункового та експериментального дослідження лабіринтних ущільнень. Але не зрозуміло, чому у цих двох випадках розглянуті ущільнення з різною

кількістю гребенів  $z=5$ , та  $z=15$ ? На мою думку, краще було б проводити порівняння для ущільнень з однаковою кількістю гребенів.

6. Незрозуміло, чому в третьому розділі, при отриманні залежності для критерію «витрата через ущільнення» за результатами визначення величини значимості коефіцієнта при факторі обертання вала було зроблено висновок про мінімальний вплив фактора обертання вала на витрату через ущільнення. А в четвертому розділі у висновках зазначено, що обертання вала викликає зменшення витрати через ущільнення, та зазначено, що для умов даного дослідження отримано зменшення витрати на 20%.

7. У четвертому розділі проводилося чисельне дослідження лабіринтного ущільнення з поступово зростаючим об'ємом розширювальних камер. Доцільно було б продемонструвати чи вдалося мінімізувати у даній конструкції нерівномірний розподіл тиску в розширювальних камерах.

8. У висновках зазначено, що відпрацьована методика чисельного моделювання течії у лабіринтному ущільненні із використанням програмного комплексу FlowVision. У тексті дисертації наведений перелік моделей, які використовувалися при моделюванні течії в даній роботі. Та вважаю, що доцільно було б в тексті дисертації представити основні рівняння, які складають математичну модель течії. Також доцільно було б надати в дисертації ознаки кожної із моделей турбулентності, за якими виконувалося порівняння.

9. На жаль, низька якість багатьох малюнків і графіків, наведених в дисертації ускладнює прочитання і сприйняття інформації.

10. У дисертаційній роботі і авторефераті присутній ряд орфографічних та синтаксичних помилок, які, однак, не викривляють суті роботи в цілому.

### **Висновок**

Проведений аналіз змісту дисертації Баги В.М. «Удосконалення методів розрахунку та проектування лабіринтних ущільнень валів пневмоагрегатів на основі моделювання робочого процесу», автореферату і публікацій дозволяє зробити такі висновки:

1. Дисертація є завершеною працею, в якій розв'язується важлива науково-практична задача розвитку теорії робочого процесу та удосконаленні методик розрахунку та проектування лабіринтних ущільнень пневмоагрегатів.

2. Тема роботи є актуальною, що обґрунтовано на початку відгуку і відповідає спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.



3. Наукова новизна і практична цінність одержаних здобувачем результатів мають місце і достатні для рівня кандидата наук.

4. Достовірність результатів: всі початкові передумови чисельних досліджень здобувач обґрунтував теоретично та порівняв із даними фізичного експерименту. Найсуттєвіші результати роботи отримані в результаті експериментального дослідження з використанням обладнання та приладів, що відповідають вимогам діючих стандартів, і за науково обґрунтованою методикою. Чисельне дослідження, що ґрунтується на основі чисельного рішення основних рівнянь гідродинаміки і допоміжних рівнянь, що описують фізичні явища, які мають місце при течії через ущільнення, дозволило отримати реальну картину течії в ущільненні, а також додаткові кількісні показники роботи ущільнення. Висновки по розділах та по роботі в цілому обґрунтовані, науково і практично значимі.

5. Результати проведеного дослідження достатньо повно оприлюднені у публікаціях та апробовані перед науковцями.

6. Автореферат об'єктивно відображає зміст дисертації, його оформлення відповідає встановленим вимогам.

Вважаю, що висловлені зауваження не знижують важливості основних досягнень здобувача. Дисертацію Баги В.М. оцінюю позитивно. Робота є завершеною науковою працею і вносить вклад у розвиток теорії робочого процесу безконтактних ущільнень в питаннях дослідження впливу режимних і геометричних факторів на величину коефіцієнта втрат лабиринтних ущільнень на основі чисельного розрахунку течії рідини в їх проточній частині.

У цілому робота «Удосконалення методів розрахунку та проектування лабиринтних ущільнень валів пневмоагрегатів на основі моделювання робочого процесу» повністю відповідає вимогам п. 13 «Порядку присудження наукових ступенів ...» щодо кандидатських дисертацій в частині отримання нових знань про особливості робочого процесу, а також що до удосконалення методики розрахунку витрати в лабиринтних ущільненнях, а її автор Бага Вадим Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент,  
кандидат технічних наук,  
завідуючий науково-дослідним відділом  
проточних частин ВАТ «ВНДПАБН»



*С.О. Лугова*  
С.О. Лугова  
В.о. н.ч. В.П. та С.П. Лугових

