

## ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук Лугової Світлани Олегівни

на дисертаційну роботу **Мірошніченка Дмитра Валерійовича**

**«ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПНЕВМОАГРЕГАТІВ,  
СТВОРЮВАНИХ НА ОСНОВІ ВИХРОВИХ РОЗШИРЮВАЛЬНИХ МАШИН»,**

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

### Актуальність теми.

Енергетична проблема, енергозбереження та відновлювані джерела енергії на разі є найважливішим питанням як для всього світу так і для України. Підвищення цін на енергоносії змушує користувачів шукати засоби до їх економії, а також до зміни співвідношення використання відновлюваних та не відновлюваних джерел енергії.

Перспективним напрямком у енергозбереженні є перехід до створення і використання автономних енергетичних установок малої потужності. Основними вимогами до малих автономних систем є їх надійність, ефективність та простота в експлуатації. Для можливості створення систем малої розподіленої енергетики перспективним напрямком є створення турбогенераторів малої потужності до 500 кВт. Дані турбогенератори та пневмоприводи можуть створюватися на базі вихрової розширювальної машини. Основними перевагами вихрових розширювальних машин є простота їх конструкції, технологічність та низька собівартість. А можливість створення подібних машин з низькими обертовими швидкостями у безредукторному виконанні підвищує їх надійність.

Основним недоліком вихрових розширювальних машин є їх низький ККД. Тому робота направлена на підвищення ККД і надійності вихрових розширювальних машин, на базі яких створюються пневмоагрегати для енергозберігаючих технологій є актуальною.

Враховуючи вищезазначене, робота Мірошніченка Д.В. 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:

– математичні моделі які використовувалися для аналізу робочого процесу базуються основних фундаментальних положеннях механіки рідини та газу, а саме на рівняннях збереження енергії, рівнянні нерозривності, рівняннях кількості руху, стану газу та зміни моменту кількості руху;

– коректною постановкою та застосуванням результатів чисельного експерименту з розрахунку просторової течії в проточній частині вихрової розширювальної машини;

– отримані в роботі наукові результати і положення ґрунтуються також на методах теорії і практики вихрових розширювальних машин;

– експериментальні дані отримані здобувачем відповідно до загальноприйнятої методики проведення експериментальних досліджень.

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

В процесі виконання дисертаційної роботи здобувачем отримано **нові результати**, які доповнюють теорію робочого процесу та практику конструювання і експлуатації вихрових розширювальних машин, а саме:

- вперше визначені області раціонального використання вихрових розширювальних машин і пневмоагрегатів на їх основі за загально визначеними критеріальними комплексами, прийнятими в теорії і практиці турбомашин;
- вперше за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX виконано моделювання і дослідження повздовжньо-вихрової течії газу в проточній частині вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом і проведено порівняння отриманих результатів із результатами експериментальних досліджень;
- підтверджено за допомогою візуалізації течії газу в проточній частині вихрової розширювальної машини вплив інтенсивності повздовжньо-вихрового руху робочого тіла на її ККД;
- вперше створена параметрична модель і методика оптимізаційного дослідження вихрових розширювальних машин в програмному комплексі ANSYS CFX, що дозволяє досліджувати вплив геометричних і газодинамічних параметрів на їх ефективність і характеристики;
- вперше досліджено вплив основних значущих геометричних і газодинамічних параметрів та співвідношень параметрів багатопотокової проточної частини вихрової розширювальної машини із зовнішнім

периферійним каналом на характеристики машини, що дало змогу підвищити більш ніж на 15% оптимальні значення ККД.

Отримані результати дійсно є новими для теорії робочого процесу та практики конструювання і експлуатації вихрових розширювальних машин.

### **Практичне значення.**

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

- вперше отримані оптимальні діапазони узагальнених безрозмірних параметрів вихрових розширювальних машин з зовнішнім периферійним каналом, які дозволяють проектувати вихрові машини на різні параметри з максимальним ККД;
- створено експериментальну модель і експериментальний стенд для дослідження вихрових розширювальних машин та пневмоагрегатів на їх основі;
- в результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримані практичні рекомендації з вибору основних параметрів вихрових розширювальних машин і агрегатів на їх основі;
- створені методики і програми розрахунку параметрів і характеристик багатопотокових, багатоканальних вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом;
- розроблена методика проектування пневмоагрегатів на базі вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом.

Основні результати дисертаційної роботи були впроваджені в навчальний процес Сумського державного університету в курсах «Пневмоагрегати та вакуумна техніка», «Розширювальні турбомашини радіального типу» для спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» за освітньою програмою «Компресори, пневмоагрегати та вакуумна техніка». Також результати впроваджені на підприємствах ТОВ ІТЦ «Смартекс» та ТОВ «Альтернативний енерговектор».

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

Апробація результатів роботи здійснена досить широко і повно у ряді науково-технічних конференцій різного рівня, в тому числі й міжнародних конференціях. Матеріали дисертації опубліковані у 21 статті, в тому числі 6 статей у наукових журналах: 5 – у фахових виданнях з переліку, затвердженому Міністерством освіти і науки України (із них 1 стаття надрукована в журналі,

який входить до бази даних Ulrich's Periodicals Directory американського видавництва Browker, що індексується в онлайнній наукометричній базі даних Index Copernicus), 1 – у журналі, що індексується науковою базою Scopus), 1 публікація у збірнику праць конференції; 1 патент на корисну модель; 13 тез доповідей.

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

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 204 сторінки, в тому числі 96 рисунків по тексту, 9 таблиць по тексту, 7 додатків і список використаних джерел інформації із 106 найменувань на 13 сторінках.

У додатках представлені результати обробки даних експериментальних випробувань, розмірні параметри та критеріальні комплекси малопотужних розширювальних машин та акти впровадження основних результатів роботи на промислових підприємствах України, та у навчальному процесі СумДУ.

**У вступі** обґрунтована актуальність проведеного дослідження, надається формулювання мети, задач 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 існуючих конструктивних схем розширювальних вихрових машин. Розглянуто їх переваги і недоліки.

Проведений огляд можливостей застосування пневмоагрегатів та наведені переваги пневмоприводів та турбогенераторів, створених на базі розширювальних вихрових машин. Номінальна частота обертання ротора вихрових машин нижча, ніж у класичних осьових і доцентрових турбін, що дозволяє створювати на їх основі агрегати в безредукторному виконанні. Це значно підвищує їх надійність.

Проведений широкий огляд і аналіз досліджень в області вихрових розширювальних машин. Обґрунтовано, що вихрові розширювальні машини з периферійним каналом є більш переважні для використання, але необхідно знайти можливості підвищення ефективності їх роботи.

На основі проведеного інформаційно-аналітичного огляду визначено, що для підвищення енергоефективності і надійності вихрових розширювальних машин з зовнішнім периферійним каналом необхідно визначити найбільш значущі геометричні і газодинамічні параметри які впливають на ККД машини, та

провести дослідження з метою досягнення максимального ККД за рахунок оптимізації геометричних розмірів проточної частини.

Аналітичний огляд наданої в наукових виданнях інформації є достатньо повним і глибоким. В результаті інформаційно-аналітичного огляду було визначено мету і задачі дослідження.

У другому розділі наведені результати чисельного оптимізаційного дослідження течії в проточній частині вихрової розширювальної машини.

У першому підрозділі наведений аналіз існуючих методів дослідження вихрових машин. Показано, що аналітичні методи мають значний обсяг припущень і спрощень робочого процесу, а також значну кількість емпіричних коефіцієнтів, що не забезпечує достатньої точності результату. А фізичний експеримент пов'язаний з великими матеріальними і часовими затратами. Тому для визначення основних геометричних і газодинамічних параметрів і співвідношень параметрів проточної частини вихрової розширювальної машини, та дослідження впливу повздовжньо-вихрового руху в проточній частині на ККД машини, вибраний чисельний експеримент із застосуванням теорії планування експерименту.

У другому підрозділі наведена методика виконання чисельного експерименту, яка базується на чисельному розрахунку системи рівнянь Рейнольдса та рівняння нерозривності і рівняння енергії. Для замикання системи рівнянь використовувалась SST модель турбулентності Ментера. Визначена розрахункова область, параметри розрахункової сітки, початкові і граничні умови. Наведені результати верифікації отриманих результатів шляхом порівняння чисельних результатів з експериментальними даними.

У третьому розділі наданий опис параметричної моделі. Наведені основні параметри параметричної моделі проточної частини вихрової розширювальної машини, виділені найбільш впливові фактори та визначені діапазони їх зміни.

У четвертому підрозділі описана методика планування експерименту і методика проведення оптимізаційного дослідження. Для планування експерименту був обраний некомпозиційний план другого порядку Vox-Behnken Design, який є найбільш ефективний в тих випадках, коли використовуються не більше трьох-чотирьох факторів. Некомпозиційний план Бокса-Бенкена при проведенні експерименту з чотирма факторами дозволяє скоротити кількість дослідів до 27. У точках плану здійснювалося чисельне моделювання течії газу із застосування програмного комплексу ANSYS CFX.

У п'ятому підрозділі наведені результати оптимізаційних досліджень двопотокової проточної частини вихрової розширювальної машини. За

результатами статистичної обробки отриманих даних були визначені коефіцієнти рівнянь регресії, проведена їх оцінка, а також оцінка головних ефектів і ефектів взаємодії. На підставі отриманих результатів були побудовані діаграми поверхонь відгуку для вихідного параметра – адіабатного ККД від попарного поєднання параметрів. Аналіз отриманих результатів показав, що впливаючі фактори і діапазони їх зміни були обрані правильно, і був отриманий оптимум для цільової функції ККД.

Також була проведена візуалізація течії, яка показала, що на ділянках де добре організовано повздовжньо-вихровий рух, відбувається ефективна передача енергії від потоку газу до лопаток робочого колеса.

З використанням отриманих результатів була спроектована проточна частина вихрової розширювальної машини потужністю 10 кВт для АГРС на робоче середовище – природний газ, ККД якої склав 48%. Для цієї проточної частини були отримані розмірні і безрозмірні характеристики, основні геометричні та режимні параметри. На базі цієї проточної частини запропоновано конструкцію турбогенератора в герметичному виконанні з розташуванням робочого колеса безпосередньо на валу генератора.

У шостому підрозділі проведено порівняльний аналіз результатів оптимізаційних досліджень проточних частин з різною кількістю потоків. Для характеристик багатопотокових схем додатково був введений безрозмірний параметр, який пов'язує довжину проточної частини в окружному напрямку для одного потоку з довжиною кола меридіонального перерізу. Отримані оптимальні значення параметрів для одно-, дво- і трьохпотокової схеми вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом.

В цілому матеріал в другому розділі викладений обґрунтовано, послідовно і якісно.

У третьому розділі наведені результати фізичного дослідження, яке проводилося для розробленої на основі чисельного експерименту вихрової розширювальної машини з двопотоковою проточною частиною із зовнішнім периферійним каналом.

Наведені принципова схема та складальне креслення експериментального стенду, широко розглянута методика проведення експериментальних досліджень, наданий опис виконання вимірів та опис контрольно-вимірювальних приладів. Описана методика обробки даних випробувань та визначені величини відносних похибок вимірювання параметрів.

В результаті експериментальних досліджень отримані характеристики оптимізованої проточної частини вихрової розширювальної машини та

підтверджено результати чисельного експерименту. При порівнянні характеристик оптимізованої проточної частини з прототипом визначено, що вдалося підвищити ККД з рівня 30% до рівня більше 45%.

**У четвертому розділі** наведена методика розрахунку та проектування агрегатів на основі вихрових розширювальних машин.

Окремий підрозділ присвячений результатам досліджень впливу радіальних навантажень на ротор для однопотокової проточної частини вихрової розширювальної машини. Показано, що створення вихрових розширювальних машин з дво- і трьохпотоковими проточними частинами дозволяє суттєво зменшити радіальне навантаження, що підвищує надійність роботи машини.

Також у четвертому розділі сформовані шляхи подальшого удосконалення вихрових розширювальних машин і агрегатів на їх основі.

**Висновки по роботі.** В роботі надано шість висновків, які узагальнюють висновки по розділах і підсумовують результати дослідження в цілому. Всі вони в логічному порядку вказують на основні результати дослідження, відображають творчий шлях здобувача і його успіхи у науковому пізнанні робочого процесу вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом на основі аналітичного та чисельного дослідження течії газу в проточній частині, та обґрунтовані результатами фізичного експерименту. За обсягом і структурою представлена дисертаційна робота відповідає установленим вимогам.

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

### **Зауваження по роботі**

1. При постановці чисельного дослідження вибрана SST модель турбулентності Ментера, але, по-перше, не наведені значення змінної  $Y^+$ , які визначають обґрунтованість застосування моделі Ментера, а по-друге, в роботі немає відомостей про те чи проводилось дослідження сіткової незалежності, і чому саме сітка з трьома мільйонами комірок використовувалася.
2. В роботі наведений розрахунок, отримані величини похибок прямих і непрямих вимірювань та зазначено, що отримана точність є допустимою

при проведенні технічного експерименту. Але доцільно було б надати посилання на нормативний документ, який визначає допустимі величини похибок.

3. В тексті дисертації присутнє найменування параметра наведеної та приведеної колової швидкості. Зі змісту використання зрозуміло, що це один параметр, то ж доцільно було б використовувати одне найменування.

4. В дисертаційній роботі і авторефераті присутній ряд орфографічних помилок, які, однак, не викривляють суть роботи в цілому.

### **Висновок**

Проведений аналіз змісту дисертації Мірошниченка Д.В. «Підвищення енергоефективності пневмоагрегатів, створюваних на основі вихрових розширювальних машин», автореферату і публікацій дозволяє зробити такі висновки:

1. Дисертація є завершеною працею, в якій розв'язуються важливі науково-практичні задачі розвитку вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом. Викладення матеріалу у тексті дисертації чітке і послідовне. Робота оформлена у відповідності до встановлених норм і вимог.

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 з даними фізичного експерименту. Найсуттєвіші результати роботи отримані в результаті чисельного дослідження, що ґрунтується на розрахунку просторової течії газу в проточній частині вихрової розширювальної машини із застосуванням теорії планування експерименту. Експериментальні дані отримані з використанням обладнання та приладів, що відповідають вимогам діючих стандартів, і за науково обґрунтованою методикою. 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 Мірошніченка Д.В. оцінюю позитивно. Робота є завершеною науковою працею і вносить вклад у теорію турбомашин в питаннях аналізу робочого процесу вихрових розширювальних машин, зокрема, в питаннях дослідження робочого процесу і характеристик вихрових розширювальних машин на основі чисельного розрахунку течії газу.

В цілому робота «Підвищення енергоефективності пневмоагрегатів, створених на основі вихрових розширювальних машин» повністю відповідає вимогам п. 9, 11, 12, 13 і 14 «Порядку присудження наукових ступенів ...» щодо кандидатських дисертацій в частині отримання нових знань про підвищення енергоефективності і надійності турбоагрегатів, створених на основі вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом, а її автор Мірошніченко Дмитро Валерійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент,  
кандидат технічних наук,  
начальник відділу проточних частин  
АТ «Сумський завод «Насосенергомаш»

 С.О. Лугова

Підпис Лугової С.О. засвідчую  
В.о. начальника відділу кадрів  
АТ «Сумський завод «Насосенергомаш»





Ю.С. Толстоп'ятих