

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Мірошниченка Дмитра Валерійовича**

**“Підвищення енергоефективності пневмоагрегатів, створюваних на основі вихрових розширювальних машин”,**

що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

На відгук представлена дисертація на 204 сторінках (96 рисунків, 9 таблиць, 7 додатків і список використаних джерел у кількості 106 найменувань на 13 сторінках) та автореферат на 21 сторінці.

### **1. Актуальність теми дисертації**

В промислових галузях розвинутих країн збільшується кількість проектів з енергозбереження та енергопостачання за рахунок впровадження малопотужних утилізаційних установок на базі розширювальних машин. Основними перешкодами на шляху широкого впровадження малопотужних (до 0,5 МВт) агрегатів є їх низький ККД і високі відносні витрати на обслуговування в порівнянні з потужними установками. Тому основні зусилля при дослідженні і створенні агрегатів малої потужності спрямовані на підвищення ККД, збільшення надійності та зниження витрат на обслуговування. Для потужностей до 500 кВт можливе створення пневмоагрегатів (зокрема пневмоприводів або турбогенераторів) на базі тихохідної (до 3000 об/хв) вихрової розширювальної машини (ВРМ) в безредукторному виконанні агрегату, що суттєво здешевлює собівартість самого агрегату і зменшує витрати на його обслуговування.

З наукової точки зору дослідження вихрових потоків завжди представляють інтерес в зв'язку зі складністю процесів, що відбуваються у тривимірній вихровій течії, та можливістю одержання унікальних позитивних ефектів при використанні вихрових потоків в практичних розробках.

Дисертаційна робота Мірошниченка Д.В. присвячена дослідженню ВРМ з метою підвищення енергоефективності та надійності цих машин і агрегатів, що створюються на їх основі. Проведений автором аналіз літературних джерел показав, що аналітичні методи розрахунку вихрових машин через труднощі урахування всіх факторів, що впливають на роботу вихрового ступеня, спираються на емпіричні дані фізичних експериментів і не завжди можуть бути використані при дослідженні нових конструкцій проточних частин. Проведення фізичних експериментів для дослідження та удосконалення вихрових машин пов'язано з великими матеріальними та часовими затратами, бо варіювання геометричними параметрами в широкому діапазоні веде до необхідності виготовлення великої кількості проточних частин. Також обмежена можливість візуалізації потоку в проточних частинах, що для вихрових машин має велике значення.

В представленій роботі перед проведенням фізичного експерименту проводився обчислювальний експеримент, спланований на основі теорії плануван-

ня експерименту для знаходження оптимальних параметрів проточної частини. Особливість роботи полягає в тому, що автором було розроблено параметричну модель і методику чисельного оптимізаційного дослідження багатопотокової ВРМ. Це дозволяє досліджувати вплив геометричних і газодинамічних параметрів на її ефективність і характеристики. З використанням розрахункового методу візуалізації течії вдалося дослідити вплив поздовжньо-вихрового руху робочого тіла в проточній частині на ККД машини. Підхід, застосований автором, дав змогу підвищити більш ніж на 15 % оптимальні значення ККД двопотокової ВРМ, при цьому вдалося значно зменшити витрати часу і коштів на підготовку і проведення теоретичних та фізичних дослідів.

В результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримані практичні рекомендації з вибору основних параметрів ВРМ і агрегатів на їх основі. Створені методики і програми розрахунку параметрів і характеристик багатопотокових, багатоканальних ВРМ з зовнішнім периферійним каналом для створення більш ефективних тихохідних пневмоагрегатів різного призначення (наприклад, турбогенераторів і турбоприводів) невеликої потужності (до 500 кВт).

Тема дослідження є актуальною оскільки маємо величезний потенціал для вирішення проблеми енергозбереження, закладений в можливості утилізації вторинних енергоресурсів (зокрема, енергії стиснутих газів і парів). Таким чином, створення утилізуючих вихрових агрегатів сприяє вирішенню науково-технічного завдання впровадження надійного, конструктивно простого та енергозберігаючого устаткування в різних галузях промисловості, що забезпечує підвищення енергоефективності продукції в різних галузях виробництва.

## **2. Рівень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна**

Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані у дисертаційній роботі, обґрунтовані в повній мірі і не суперечать результатам раніше виконаних наукових робіт. Їх достовірність підтверджується результатами відомих та власних експериментальних досліджень. У дослідженнях дисертанта використовувалися методи математичного та фізичного моделювання з застосуванням методів планування експерименту та методів оптимізації. Достовірність отриманих в роботі результатів забезпечена коректною постановкою задач теоретичного та експериментального дослідження, застосуванням сучасних методів досліджень і вимірювального обладнання, та використанням коректної методики обробки експериментальних даних.

Нові наукові результати, вперше отримані автором в області вивчення та вдосконалення ВРМ та пневмоагрегатів, що створюються на їх основі, полягають в наступному:

– визначені області раціонального використання ВРМ і пневмоагрегатів на їх основі за загальноновизначеними критеріальними комплексами, прийняти-

ми в теорії і практиці турбомашин;

- обґрунтована регенеративна гіпотеза робочого процесу вихрової турбомашини з використанням сучасних програмно-розрахункових засобів;

- з використанням програмного комплексу ANSYS CFX виконано моделювання та дослідження поздовжньо-вихрової течії газу в проточній частині ВРМ з зовнішнім периферійним каналом і підтверджено, згідно регенеративної гіпотези робочого процесу вихрових машин, з використанням візуалізації вплив інтенсивності поздовжньо-вихрового руху робочого тіла на ККД вихрових розширювальних машин;

- створена параметрична модель і методика оптимізаційного дослідження ВРМ в програмному комплексі ANSYS CFX, що дозволяє досліджувати вплив геометричних і газодинамічних параметрів на їх ефективність і характеристики;

- досліджено вплив основних значущих геометричних і газодинамічних параметрів та співвідношень параметрів багатопотокової проточної частини ВРМ із зовнішнім периферійним каналом на характеристики машини, що дало змогу підвищити більш ніж на 15 % оптимальні значення ККД.

Наукові положення, що винесені на захист, мають наукову новизну, наукову та практичну значимість. Степінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, є достатнім і відповідає вимогам до таких робіт.

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

До практичного значення можна віднести наступні результати, одержані при виконанні дисертаційної роботи:

- створено експериментальну модель, експериментальний стенд та нові програмні засоби для дослідження ВРМ та пневмоагрегата на їх основі;

- вперше отримано оптимальний діапазон узагальнених безрозмірних параметрів ВРМ з зовнішнім периферійним каналом, які дозволяють проектувати вихрові машини на різні параметри для роботи в зоні максимального ККД;

- в результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримані практичні рекомендації з вибору основних параметрів ВРМ і агрегатів на їх основі;

- створені методики і програми розрахунку параметрів і характеристик багатопотокових, багатоканальних ВРМ з зовнішнім периферійним каналом;

- розроблена методика проектування пневмоагрегатів на базі ВРМ з зовнішнім периферійним каналом;

- запатентована оптимізована проточна частина ВРМ.

Ці результати отримані при проведенні досліджень згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки "Енергетика та енергоефективність", зокрема, у рамках науково-дослідних робіт:

- «Розроблення енергозберігаючого турбогенератора для утилізації енергії стиснутих газів» (замовник – Міністерство освіти і науки України, номер державної реєстрації 0117U007375);

- «Дослідження робочих процесів енергетичних машин» (номер державної реєстрації 0110U004210).

Враховуючи це, дисертаційна робота Мірошніченка Д.В. має наукову і практичну направленість та значення, а її результати можуть використовуватися для проектування ВРМ та пневмоагрегатів на їх основі.

#### **4. Аналіз і оцінка змісту дисертації**

Робота Мірошніченка Д.В. виконана на кафедрі технічної теплофізики Сумського державного університету. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, у яких підтверджується впровадження основних результатів роботи на підприємствах та у навчальному процесі в Сумському державному університеті.

Текст дисертації має перелік умовних позначень, індексів та скорочень, який значно поліпшує процес знайомства з роботою.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету і завдання дисертаційної роботи, стисло викладено методологічні засади досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів, їх теоретичне та практичне значення, відображено повноту їхнього викладу в публікаціях та ступінь апробації на всеукраїнських та міжнародних конференціях.

**У першому розділі** обґрунтовано потребу в малопотужних пневмоагрегатах для промисловості та представлений аналіз можливостей і перспективність застосування пневмоагрегатів на базі ВРМ.

Представлені результати інформаційно-аналітичного огляду в області досліджень ВРМ. Проведений аналіз літературних джерел виявив, що на інтенсивність вихрового руху, а отже, і на ефективність вихрової машини визначальним чином впливає організація повздовжньо-вихрової течії робочого тіла в проточній частині.

Автор обґрунтував перспективність вихрових ступенів із зовнішнім периферійним каналом, бо вони легко компонуються в багатопотокові, багатоканальні і багатоступінчаті машини, простіші у виготовленні і мають значно менші осьові габарити. Приведені результати теоретичних та експериментальних досліджень однопотокових проточних частин з зовнішнім периферійним каналом.

Для розвантаження ротора машини від радіальних зусиль і збільшення виробленої потужності запропоновано виготовляти ВРМ за багатопотоковою схемою. При цьому автор роботи зазначає, що системні дослідження багатопотокових схем в літературних джерелах відсутні, а відомі значення ККД розширювальних машин в багатопотоковому виконанні не перевищують 30%.

**У другому розділі** автор виділяє недоліки розглянутих в першому розділі математичних моделей течії в проточній частині ВРМ з зовнішнім периферійним каналом та обґрунтовує створення параметричної моделі проточної частини ВРМ для проведення теоретичних досліджень з застосуванням програмного комплексу ANSYS для автоматизації обчислювального процесу.

При створенні нової проточної частини ВРМ на основі відомих досліджень обрані найбільш впливові геометричні і термогазодинамічні параметри на ККД машини.

Представлені параметрична модель і методика чисельного оптимізаційного дослідження багатопотокової ВРМ в програмному комплексі ANSYS. Сплановані (із застосуванням теорії планування експерименту) та проведені обчислювальні експерименти, за результатами яких виконана багатокритеріальна оптимізація, що дозволило знайти геометричні параметри проточних частин і їх співвідношення, що забезпечують максимальний адіабатний (ізоентропний) ККД багатопотокових ВРМ з зовнішнім периферійним каналом для прийнятого діапазону варіювання параметрами. Отримано рівняння регресії – залежність ККД проточної частини ВРМ від досліджуваних факторів.

Проведено порівняльний аналіз результатів оптимізаційних досліджень проточних частин з різною кількістю потоків і отримано узагальнені оптимальні значення параметрів для трьох схем ВРМ із зовнішнім периферійним каналом.

Використання результатів візуалізації показало, що поздовжньо-вихрова течія є основною при передачі енергії від робочого тіла лопаткам робочого колеса і чим краще організована ця течія, тим вище ККД машини.

**У третьому розділі** подано опис нового стенду, створеного для дослідження ВРМ малої потужності (до 15 кВт), оптимізованої експериментальної моделі двохпотокової ВРМ та створеної інформаційно-вимірювальної системи стенду. Наведена методика проведення експериментальних досліджень.

Отримані експериментальні характеристики двохпотокової ВРМ із зовнішнім периферійним каналом. Результати експериментальних досліджень ВРМ виконані з задовільною точністю і підтвердили результати чисельних досліджень. З використанням результатів теоретичних та експериментальних досліджень були визначені значення емпіричних коефіцієнтів в рівняннях для визначення ККД проточної частини ВРМ.

**У четвертому розділі** виконано порівняння параметрів маловитратних розширювальних турбомашин різних типів. Визначено області раціонального використання ВРМ за основними критеріальними комплексами, загальнознайними в теорії і практиці турбомашин, такими як: приведена частота обертання (коефіцієнтом швидкохідності), приведений діаметр, приведена колова швидкість робочого колеса, коефіцієнт витрати на виході розширювальної машини, коефіцієнт комплексної потужності машини.

За результатами досліджень радіальних сил, що діють на ротор в однопотокових схемах, зроблено висновок, що вихрові однопотокові ступені з розташуванням робочого колеса безпосередньо на валу електрогенератора можна

використовувати до тиску газу на вході в машину до 1.2 ... 1.8 МПа, при більш високих вхідних тисках необхідно застосовувати багатопотокові схеми. У порівнянні з трьохпотоковою двопотокова схема має більш просту конструкцію і менші, ніж у трьохпотокової, оптимальні значення приведеної колової швидкості  $\bar{U}$ . Для утилізаційних детандерних установок малої потужності застосування двопотокової схеми найбільш доцільно, бо при такій схемі вдається врівноважити радіальні сили за рахунок створення більш простої і компактної конструкції.

В результаті досліджень створена методика розрахунку параметрів та характеристик ВРМ і пневмоагрегатів на їх основі. Розроблено рекомендації, спрямовані на забезпечення роботи агрегатів, що створюються на основі ВРМ, працюючих в зоні максимальної ефективності в діапазоні зміни ступеня зниження тиску в машині  $P_T = 1.2-6.0$ .

Сформовано та обґрунтовано шляхи подальшого удосконалення ВРМ і установок на їх основі.

**Висновки** по роботі відповідають задачам виконаного дослідження та узагальнюють результати представленої дисертаційної роботи.

Подано список використаних вітчизняних та зарубіжних літературних джерел, а також додатки.

Матеріал дисертації подано в логічній послідовності відповідно до поставлених задач дослідження, їх вирішення розкрито повністю, матеріал якісно викладено літературною технічною мовою. Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. Обсяг і структура роботи, що рецензується, відповідають вимогам, встановленим положенням МОН України.

## 5. Основні зауваження

1. У підрозділі 1.3 розділу 1 приведені максимальні ККД різних проточних частин вихрових машин, які були одержані у відомих дослідженнях, але в дисертаційній роботі не проведений аналіз максимально можливого значення ККД досліджуваної проточної частини і порівняння його можливого значення з одержаними величинами.

2. У розділі 2 були виділені параметри, що впливають на ККД проточної частини, з яких було виділені чотири, які на думку дисертанта найбільш впливові. Автором не пояснюється степінь впливу інших параметрів, які не варіювалися, а задавалися постійними.

3. У розділі 3 представлена конструкція спеціально створеного стенду, який дозволяє досліджувати різні конструкції проточних частин ВРМ та різні типи турбогенераторів на їх основі, але приведені результати експериментальних досліджень тільки оптимізованої проточної частини. Геометричні характеристики об'єкту експериментального дослідження приведені не в повному обсязі.

4. При описанні нової методики розрахунку параметрів та характеристик багатопотокової ВРМ (розділ 4) не розкрито питання урахування реальних властивостей робочого тіла. Проте вирішення цього питання потребує спеціального дослідження з використанням стенду замкнутого контуру.

5. При викладені методики розрахунку характеристик ВРМ (розділ 4) не розкрито вплив критеріїв подібності, зокрема, умовних чисел Маха ( $M_u$ ) та Рейнольдса ( $Re_u$ ) на характеристики.

6. Мають місце методологічні недоліки, зокрема, автором вперше з використанням сучасних програмних засобів виконано розрахунок та на цій основі одержано візуалізацію повздовжньою-вихрового потоку в проточній частині ВРМ, що переконливо обґрунтовує регенеративну гіпотезу робочого процесу вихрової машини. Але цей факт в дисертації не зафіксовано.

7. В дисертації допущені русизми («окружна» швидкість замість колової; «створюваних» замість, «що створюються» і т. ін), є ряд друкарських помилок і неточностей оформлення. Проте висловлені зауваження не впливають на високий науковий рівень роботи та на її загальну позитивну оцінку.

## **6. Оцінка змісту автореферату, апробації і публікації основних положень і результатів дисертації**

Автореферат дисертації написаний у відповідності з вимогами до його оформлення, розкриває зміст виконаної роботи і в повному обсязі відображає загальний зміст та основні положення дисертації.

Апробація результатів дисертаційної роботи здійснена досить повно і широко. Основний зміст дисертації відображений у 21 публікації, у тому числі: 6 статей у наукових журналах (5 – у фахових виданнях, з затвердженого переліку МОН України (1 стаття надрукована в журналі, який входить до бази даних Ulrich's Periodicals Directory американського видавництва Bowker; індексується в онлайнній наукометричній базі даних Index Copernicus), 1 – у журналі, що індексується науковою базою даних Scopus); 1 публікація у збірнику праць конференції; 1 патент на корисну модель; 13 тез доповідей.

Бесіда із здобувачем підтвердила, що заявлений ним особистий внесок відповідає дійсності, а дисертація написана ним особисто.

## **7. Висновок**

1. Дисертаційна робота Мірошніченка Д. В. «Підвищення енергоефективності пневмоагрегатів, створюваних на основі вихрових розширювальних машин» відповідає вимогам, які пред'являються до виконання та оформлення дисертаційних робіт.

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

3. Результати дисертації мають наукову новизну і практичне значення.
4. Отримані результати є достовірними. Висновки по розділам та роботі є коректними і достатньо обґрунтованими.
5. Основні результати дисертації апробовані та опубліковані досить повно.
6. Дисертація є завершеною роботою. Роботу оформлено у відповідності до діючих правил і вимог.

Дисертацію Мірошніченка Д. В. оцінюю позитивно. Робота є закінченим науковим дослідженням, в якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що дають змогу проектувати багатопотокові вихрові розширювальні машини та тихохідні пневмоагрегати невеликої потужності (до 500 кВт), що створюються на їх основі. Тема дисертації має актуальність, наукове та практичне значення, виконана на високому рівні, а її автор Мірошніченко Д. В. заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент  
провідний науковий співробітник СКБ  
АТ «Сумське машинобудівне НВО»  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,



В. П. Парафійник

Підпис д.т.н. затверджую.  
Інспектор канцелярії СКБ,  
АТ «Сумське машинобудівне НВО»



Н. М. Сидоренко