

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІРОШНИЧЕНКО ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 620.97: 621.438.9

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

Спеціальність 05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
ВАНЄЄВ Сергій Михайлович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри технічної теплофізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
ПАРАФІЙНИК Володимир Петрович,
ПАТ «Сумське машинобудівне НВО»,
провідний науковий співробітник СКБ;

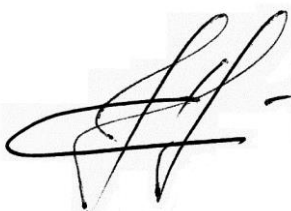
кандидат технічних наук
ЛУГОВА Світлана Олегівна,
АТ «Сумський завод «НАСОСЕНЕРГОМАШ»»
м. Суми, завідувач відділу проточних частин
науково-технічного центру.

Захист відбудеться «21» грудня 2019 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: вул. Римського-Корсакова 2, м. Суми, 40007, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету (вул. Римського-Корсакова 2, м. Суми, 40007, Україна).

Автореферат розісланий: «18» листопада 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К 55.051.03,
кандидат технічних наук, доцент



Є. М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час перспективним напрямком в енергетиці є розвиток малих локальних енергоустановок. Малі модульні системи почали перевершувати по ефективності та екологічним характеристикам стаціонарні електростанції. Також збільшується реалізація проектів з енергопостачання за рахунок впровадження малопотужних утилізаційних установок на базі детандерної техніки.

Основними перешкодами на шляху широкого впровадження малопотужних (до 0,5 МВт) установок є їх низький ККД і високі вартість і відносні витрати на обслуговування в порівнянні з потужними установками. Тому основні зусилля при дослідженні і створенні енергоустановок малої потужності спрямовані на підвищення ККД, зменшення їх вартості, збільшення надійності та зниження витрат на обслуговування.

Для потужностей до 500 кВт часто можливе створення пневмоагрегатів (зокрема пневмоприводів або турбогенераторів) на базі вихрової розширювальної машини в безредукторному виконанні.

Вихрова розширювальна машина (ВРМ) має всі переваги класичних розширювальних машин (доцентрових і осьових): єдина рухома частина - робоче колесо, яке здійснює обертальний рух, тому її надійність визначається, практично, надійністю і довговічністю тільки підшипникових вузлів; стабільні вихідні характеристики; "суха" (безмасляна) робоча порожнина; проста в обслуговуванні.

Основними перевагами вихрової розширювальної машини в порівнянні з осьовою або доцентровою є: простота конструкції, технологічність і низька собівартість виготовлення, порівняльно низька оборотність, тобто при інших рівних умовах оптимальна частота обертання ротора вихрової машини менше оптимальної частоти обертання ротора класичної розширювальної машини. Тому при використанні вихрової розширювальної машини можливо безредукторне виконання агрегату, що різко здешевлює машину і скорочує витрати на обслуговування.

Відомі турбодетандерні установки на базі струминно-реактивної розширювальної машини. Але ці розширювальні машини високообертові, і тому в конструкції установок на їх основі необхідно застосовувати редуктор.

Широке впровадження малопотужних пневмоагрегатів для енергозабезпечення вимагає широких всебічних теоретичних і експериментальних досліджень та випробувань модельних і натурних розширювальних машин та турбогенераторів у цілому. Для виконання таких досліджень необхідно створення матеріально-технічної бази, що включає нові і модернізовані стенди, експериментальні модельні та натурні установки, об'єкти дослідження, виробниче та технологічне обладнання. Дослідні характеристики, отримані в результаті експериментальних досліджень, дають змогу відпрацювати методику розрахунку параметрів і характеристик вихрових розширювальних машин підтвердити достовірність результатів теоретичних досліджень та розроблених принципів проектування малообертових вихрових розширювальних машин і пневмоагрегатів на їх основі, що використовують енергію стиснутого газу.

Виходячи з усього вищевикладеного, тема дослідження є актуальною, оскільки величезний потенціал для вирішення проблеми енергозбереження закладений в утилізації вторинних енергоресурсів (зокрема енергії стиснутих газів і парів). Створення утилізуючих вихрових агрегатів сприяє вирішенню науково-технічної задачі впровадження надійного, конструктивно простого та енергозберігаючого устаткування в різних галузях промисловості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційне дослідження виконувалось згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки "Енергетика та енергоефективність". Здобувач був виконавцем держбюджетної науково-технічної роботи «Розроблення енергозберігаючого турбогенератора для утилізації енергії стиснутих газів» (замовник – Міністерство освіти і науки України, номер державної реєстрації 0117U007375) та науково-дослідної роботи на тему «Дослідження робочих процесів енергетичних машин» (номер державної реєстрації 0110U004210).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення енергоефективності і надійності вихрових розширювальних машин з зовнішнім периферійним каналом.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі дослідження:

- обґрунтувати доцільність застосування агрегатів на основі вихрових розширювальних машин та визначити область їх раціонального використання;

- провести чисельні дослідження вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом у програмному комплексі ANSYS CFX з метою відпрацювання методики розрахунку течії газу та порівняння з експериментальними даними;

- розробити параметричну модель вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом, спланувати обчислювальний експеримент з вибором значущих факторів та провести чисельні дослідження за допомогою програмно-обчислювального комплексу з метою досягнення максимального ККД за рахунок оптимізації геометричних розмірів проточної частини;

- провести експериментальні дослідження вихрової розширювальної машини з метою отримання експериментальних параметрів і характеристик та підтвердження адекватності математичної моделі за результатами теоретичних досліджень;

- розробити методику розрахунку параметрів одно- та багатопотокової проточної частини вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом;

- розробити за результатами теоретичних та експериментальних досліджень рекомендації, спрямовані на забезпечення роботи агрегатів на основі вихрових розширювальних машин в зоні максимальної ефективності, а також впровадити отримані результати в навчальний процес і на промисловому підприємстві.

Об'єкт дослідження. Робочі процеси, що протікають в вихровій розширювальній машині та агрегатах на її основі.

Предмет дослідження. Параметри і характеристики вихрової розширювальної машини та агрегатів на її основі.

Методи дослідження. На першому етапі досліджень застосовувався аналіз та наукове узагальнення даних літературних джерел, що дало можливість обґрунтувати актуальність наукової задачі і сформулювати завдання досліджень.

Для дослідження робочого процесу вихрової розширювальної машини використовувалися методи математичного та фізичного моделювання з застосуванням методів планування експерименту та методів оптимізації.

Математична модель течії газу базується на рівняннях збереження енергії, нерозривності, кількості руху, стану газу, а також зміни моменту кількості руху, які використовувалися як в диференційній, так і в інтегральній формах.

Для чисельного моделювання течії газу в вихровій розширювальній машині використовувався програмно-обчислювальний комплекс ANSYS CFX.

Фізичний експеримент містить дослідження вихрової розширювальної машини.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше визначені області раціонального використання вихрових розширювальних машин і пневмоагрегатів на їх основі за загальновизначеними критеріальними комплексами, прийнятими в теорії і практиці турбомашин;

- вперше за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX виконано моделювання та дослідження поздовжньо-вихрової течії газу в проточній частині вихрових розширювальних машин 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 поздовжньо-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 досліджений 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% (з рівня 30% до рівня більш 45%) оптимальні значення ККД;

- отримані експериментальні характеристики двопотокової вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом.

Практичне значення одержаних результатів:

- вперше отримані оптимальні діапазони узагальнених безрозмірних параметрів вихрових розширювальних машин з зовнішнім периферійним каналом, які дозволяють проектувати вихрові машини на різні параметри в зоні максимального 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 з зовнішнім периферійним каналом; що має практичну цінність при розробці цих машин;
- розроблена методика проектування пневмоагрегатів на базі вихрових розширювальних машин з зовнішнім периферійним каналом;
- основні результати роботи 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 ІПЦ «Смартекс» та ТОВ «Альтернативний енерговектор».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно та опубліковані у статтях та роботах [1-21]. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником. У публікаціях здобувачу належить наступне. У роботах [1, 3] виконано порівняльний аналіз детандерних установок малої потужності, який показав, що перспективними є пневмоагрегати на базі вихрових розширювальних машин. У роботах [1, 3, 9] здобувач провів аналіз публікацій по даній тематиці, виклав проблему і зв'язок з науковими та практичними задачами. У роботах [1, 2, 10, 11] здобувач описав методику створення параметричної моделі ВРМ, що дозволяє досліджувати вплив геометричних і газодинамічних параметрів на ККД і картину течії в проточній частині вихрових розширювальних машин, та провів обчислювальні дослідження течії газу. У роботах [2, 4, 11, 12, 13] здобувачем спланований (із застосуванням теорії планування експерименту) і виконаний обчислювальний експеримент, за результатами якого отримано залежність ККД розширювальної машини від основних значущих факторів. Також в роботах [2, 4, 11, 12, 13] виконана багатокритеріальна оптимізація, яка дозволяє знайти геометричні параметри проточної частини, які забезпечують максимальний ККД, що дало змогу підвищити більш ніж на 15% (з рівня менше 30% до рівня більш 45%) оптимальні значення ККД вихрової двопотокової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом. У роботах [2, 4, 17, 19] здобувач представив оброблені (у вигляді графічних залежностей) результати чисельних досліджень, провів аналіз результатів, отримав узагальнені оптимальні значення параметрів для трьох схем вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом, а також представив деякі рекомендації з проектування вихрових розширювальних машин. В роботах [5, 6, 14, 18, 20] автор описав створення експериментальної моделі вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом, турбогенератора на її основі і експериментального стенду для дослідження вихрових розширювальних машин та пневмоагрегатів на їх основі. Для забезпечення контролю обладнання стенду та автоматизації реєстрації параметрів ВРМ в процесі випробувань створено інформаційну вимірювальну систему, яка складається з програмного забезпечення, контролерів та датчиків. Для визначення потужності та ККД вихрової машини особисто автором створений бездротовий датчик крутного моменту (тензометричну муфту ТМ100). В результаті експериментальних досліджень отримано

характеристики оптимізованої проточної частини та підтверджено результати обчислювального експерименту. В роботах [8, 15, 16, 21] автором вивчена можливість застосування детандер-генераторів на основі вихрових розширювальних машин як джерела електроенергії у промисловості при утилізації енергії стиснених газів та у складі енергетичних установок. За результатами виконаних робіт отримано патент [7].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на:

- Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2011 р.);
- X міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології» (м. Одеса, 2015 р.);
- XVI міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Суми, 2015 р.);
- I Міжнародній науково-практичній конференції «Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво» (м. Суми, 2016 р.);
- IV Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2016 р.);
- XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2016 р.);
- Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2017 р.);
- XI міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології» (м. Одеса, 2017 р.);
- XXIII Міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2018 р.);
- XIX Міжнародній науково-технічній конференції АСПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Львів, 2018 р.);
- V Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2018 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 21 наукова праця, 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.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 204 сторінок. Дисертаційна робота містить 96 рисунків, 9 таблиць, 7 додатків і список використаних джерел у кількості 106 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність створення пневмоагрегатів (зокрема пневмоприводів або турбогенераторів) на базі тихохідної вихрової розширювальної машини. Відзначено, що основні зусилля при дослідженні і створенні енергоустановок малої потужності спрямовані на підвищення ККД, зменшення їх вартості, збільшення надійності та зниження витрат на обслуговування. Визначено об'єкт і предмет досліджень, сформульовано мету, завдання та методи дослідження. Розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Подано відомості про апробацію та впровадження результатів роботи.

У **першому розділі** представлений аналіз можливостей застосування пневмоагрегатів на базі вихрових розширювальних машин. Представлені результати інформаційно-аналітичного огляду в області досліджень вихрових розширювальних машин.

Переваги тихохідних вихрових розширювальних машин дозволяють створювати тихохідні енергозберігаючі агрегати відносно дешеві, прості конструктивно і технологічно, надійні та зручні в експлуатації.

Проведений аналіз літературних джерел виявив, що на інтенсивність вихрового руху, а отже, і на ефективність вихрової машини суттєвий вплив має організація повздовжньо-вихрової течії робочого тіла. Також аналіз показав, що використання вихрових розширювальних машин обмежується через відносно низькі значення ККД, що обумовлено особливостями робочого процесу, нестачею теоретичних і експериментальних досліджень.

Існує інтерес до вихрових ступенів із зовнішнім периферійним каналом, бо вони легко компонуються в багатопотокові, багатоканальні і багатоступінчасті машини, простіші у виготовленні і мають значно менші осьові габарити в порівнянні з іншими типами проточних частин вихрових машин.

Для розвантаження ротора машини від радіальних зусиль і збільшення виробленої потужності доцільно виготовляти вихрові розширювальні машини за багатопотоковою схемою.

Системні дослідження багатопотокових схем в літературних джерелах відсутні, а відомі значення ККД розширювальних машин в багатопотоковому виконанні не перевищують 30%.

У результаті огляду літературних джерел зроблені висновки про актуальність теми дослідження, визначена мета роботи і поставлені задачі дослідження.

У **другому розділі** представлені розроблена параметрична модель і методика чисельного оптимізаційного дослідження багатопотокової вихрової розширювальної машини в програмному комплексі ANSYS, за допомогою яких були проведені дослідження впливу геометричних і газодинамічних параметрів на її ефективність і характеристики, а також результати цих досліджень.

На першому етапі дослідження була проведена верифікація одержуваних обчислювальним експериментом даних для підтвердження коректної роботи використовуваної методики чисельних досліджень. Для цього, як прототип віртуального стенду, був обраний експериментальний стенд на якому випробовувалася експериментальна модель однопотокової вихрової

розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом. Була створена модель цієї машини у програмному комплексі ANSYS CFX і розрахована залежності адіабатного (ізоентропного) ККД від відношення тиску на вході в розширювальну машину до тиску на виході з неї. Аналіз розрахункової і експериментальної залежностей показав їх гарний збіг.

Адіабатний ККД при проведенні обчислювального експерименту визначався за формулою:

$$\eta = \frac{M_z \cdot \omega}{h_s \cdot m}$$

де M_z - обертальний момент на валу розширювальної машини, Н·м;

ω - кутова швидкість обертання ротора, рад/с;

h_s - наявна питома робота розширення газу в розширювальній машині, Дж/кг;

m - споживана масова витрата газу, кг/с.

При проведенні обчислювальних експериментів значення h_s і ω визначалися за вихідними даними і аналітичними залежностями, а значення M_z і m - в результаті обчислювальних експериментів.

Для усунення радіальних навантажень на підшипники і більш ефективного використання довжини проточної частини було прийнято рішення про необхідність переходу на багатопотокову схему.

Була створена параметрична модель багатопотокової проточної частини вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом (рис. 1) і методика оптимізаційних чисельних досліджень цієї машини у програмному комплексі ANSYS, що дозволяє досліджувати вплив геометричних і газодинамічних параметрів на її ефективність і характеристики.

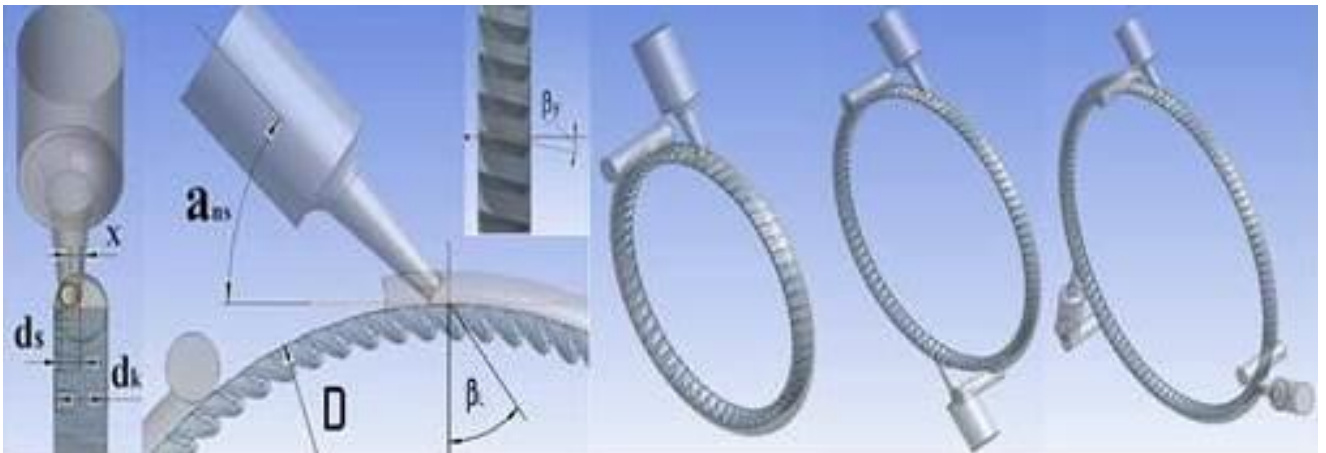


Рисунок 1 – Параметрична модель вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом

Результати відомих досліджень вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом для однопотокової схеми дозволили виділити найбільш впливові фактори і визначити діапазони їх зміни: наведена колова швидкість робочого колеса, $\bar{U}=0,1\dots0,2$; відносний діаметр проточної частини $\bar{d}_{ph} = d_k/D=0,06\dots0,12$; відносний діаметр сопла $\bar{d}_s = d_c/d_k=0,3\dots0,45$; кут нахилу сопла $\alpha_{ns}=30\dots50$ град.

Параметр \bar{U} дуже широко використовується в теорії та практиці розширювальних турбомашин і пов'язує частоту обертання розширювальної машини, її габарити і наявну роботу розширення газу в ній. Так, для класичних радіальних розширювальних машин максимальний ККД відповідає параметру $\bar{U} \approx 0,5 \dots 0,7$.

$$\bar{U} = \frac{U}{C_s} = \frac{\omega \cdot D}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot h_s}}$$

Відносний діаметр проточної частини \bar{d}_{ph} – це відношення діаметра каналу в меридіональному перерізі проточної частини до зовнішнього діаметра робочого колеса. Відносний діаметр сопла \bar{d}_s – це відношення діаметра сопла у вихідному перерізі до діаметру каналу в меридіональному перерізі проточної частини. Кут нахилу сопла α_{ns} визначає кут атаки при натіканні газу з сопла на лопатки робочого колеса.

Із застосуванням теорії планування експерименту сплановано обчислювальний експеримент. Для функціонального зв'язку між геометричними параметрами проточної частини і вихідними даними був обраний поліном другого порядку. Для проведення експерименту було обрано некомпозиційний план другого порядку Бокса-Бенкена, який при проведенні експерименту з чотирма факторами для отримання значень коефіцієнтів квадратичного полінома дозволяє скоротити кількість дослідів з 81 до 27. Проведені обчислювальні експерименти та виконана багатокритеріальна оптимізація, що дозволило знайти геометричні параметри проточних частин і їх співвідношення, що забезпечують максимальний адіабатний (ізоентропний) ККД багатопотокових вихрових розширювальних машин з зовнішнім периферійним каналом. На рис. 2 показано карти ліній рівня та графіки поверхонь відгуку для вихідного параметра «адіабатний ККД» для двопотокової проточної частини.

Візуалізація течії газу в проточній частині вихрової розширювальної машини показала, що поздовжньо-вихрова течія є базовою при передачі енергії від робочого тіла лопаткам робочого колеса, і чим краще організована ця течія, тим вище ККД машини рис. 3.

За візуалізацією течії (рис. 3) і з розподілу статичного тиску по довжині проточної частини (рис. 4) видно, що в однопотоковій проточній частині виникають радіальні зусилля, а двопотокова проточна частина розвантажена від цих зусиль.

На рис. 4 показано зміну статичного тиску по довжині робочого каналу в окружному напрямку для однопотокової і двопотокової проточної частини.

Оптимальні значення ККД вихрової двопотокової машини із зовнішнім периферійним каналом вдалося підвищити більш ніж на 15 % (з рівня 30 % до рівня більш 45 %). Збільшення ККД отримано без ускладнення конструкції (без застосування статорних напрямних лопаток, без зміни площі робочого каналу від входу до виходу тощо) за рахунок організації поздовжньо-вихрового руху на всій довжині робочого каналу проточної частини (рис.5) шляхом оптимального вибору геометричних параметрів проточної частини за розробленою методикою.

За результатами теоретичних досліджень спроектована двопотокова проточна частина вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним

каналом з розрахунковим ККД 48 % (на робочому режимі при частоті обертання ротора 3000 об/хв.) і отримані її безрозмірні і розмірні характеристики.

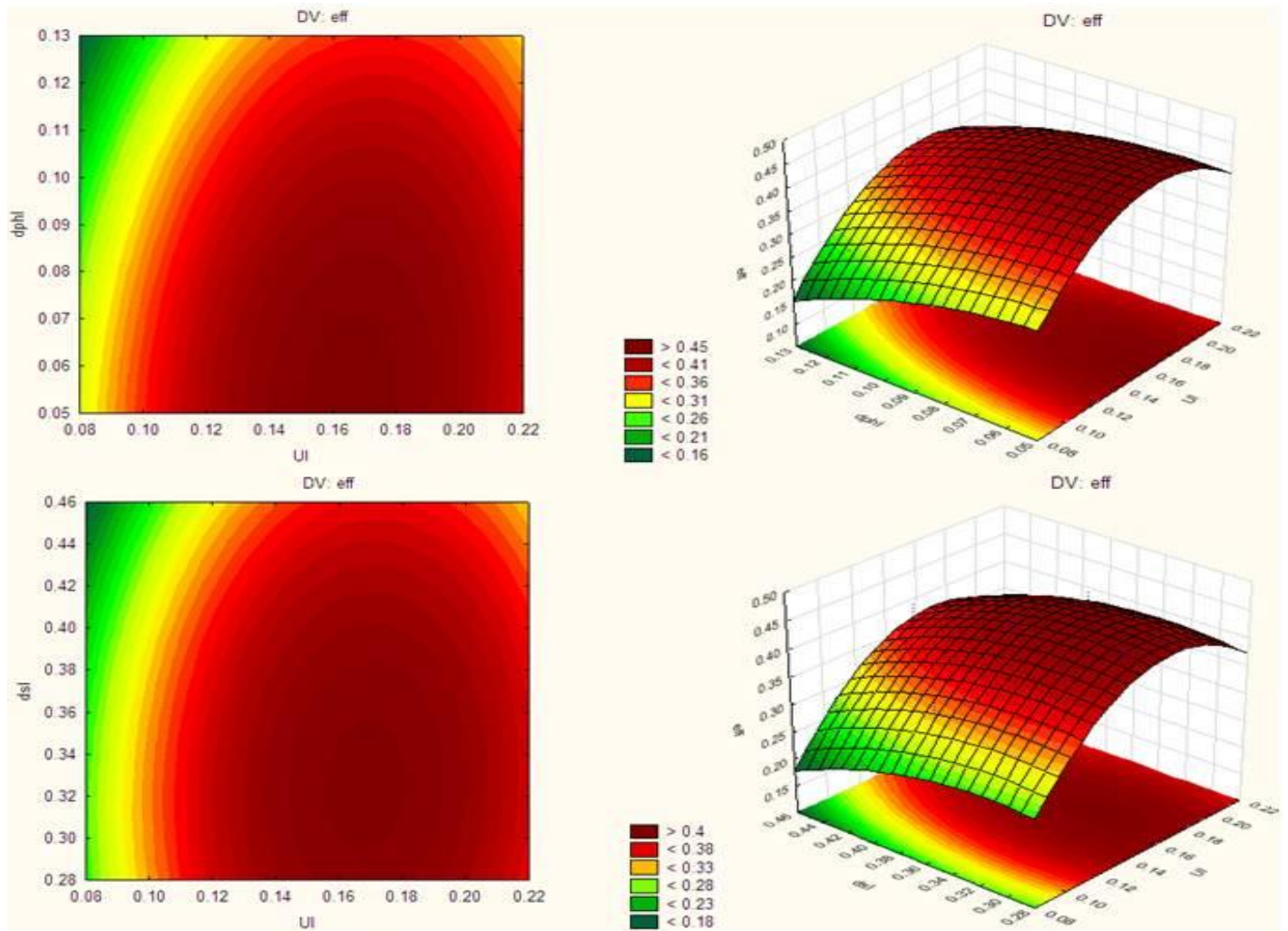


Рисунок 2 - Поверхні відгуку: карти ліній рівня та графіки поверхонь відгуку для вихідного параметра «eff - Адіабатний ККД» для двопотокової проточної частини

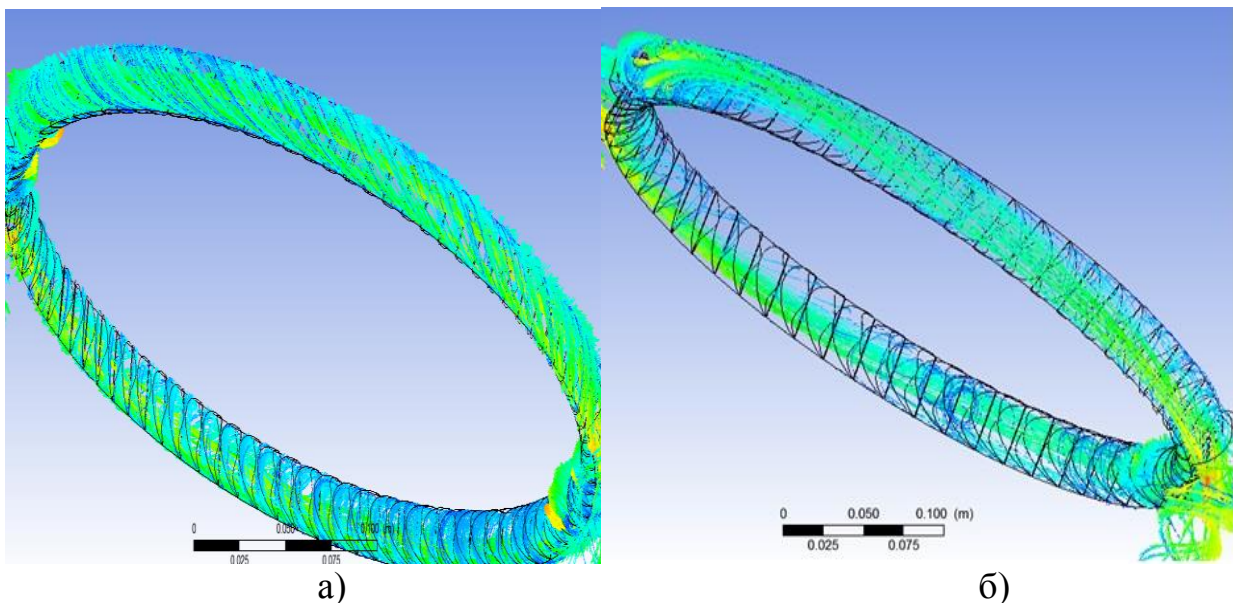
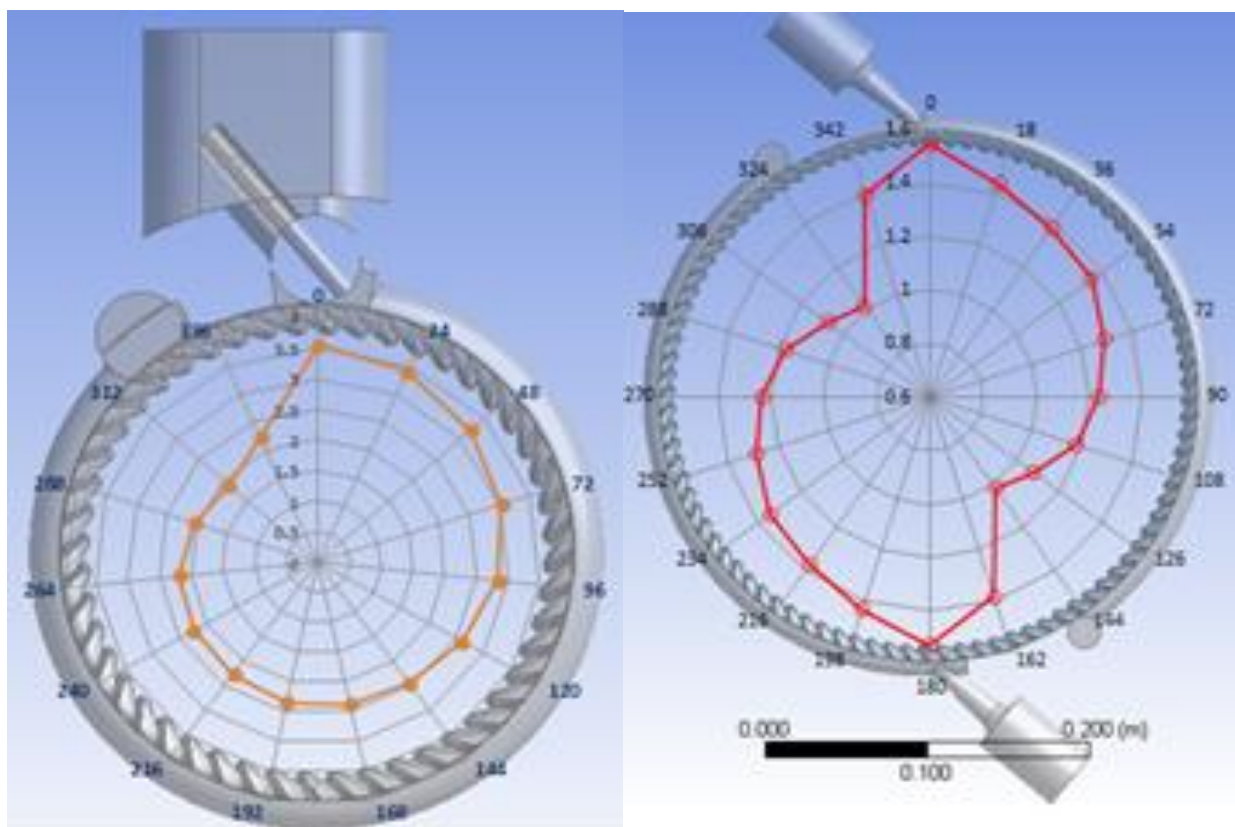


Рисунок 3 - Візуалізація течії газу в проточній частині вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом (а - ККД = 48%, б - ККД = 24%).



а)

б)

Рисунок 4 – Графіки розподілу статичного тиску по довжині робочого каналу одно потокової (а) і двопотокової (б) проточної частини

Проведено порівняльний аналіз результатів оптимізаційних досліджень проточних частин з різною кількістю потоків і отримано узагальнені оптимальні значення параметрів для трьох схем вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом (рис. 3, 5, 6) в діапазоні відношення тисків $\Pi_T = 2-6$: $\bar{U} = 0.12 \dots 0.2$, $\bar{d}_s = 0.28 \dots 0.38$, $\alpha_{ns} = 25 \dots 50$ град, $\bar{L}_p = 8 \dots 11$.

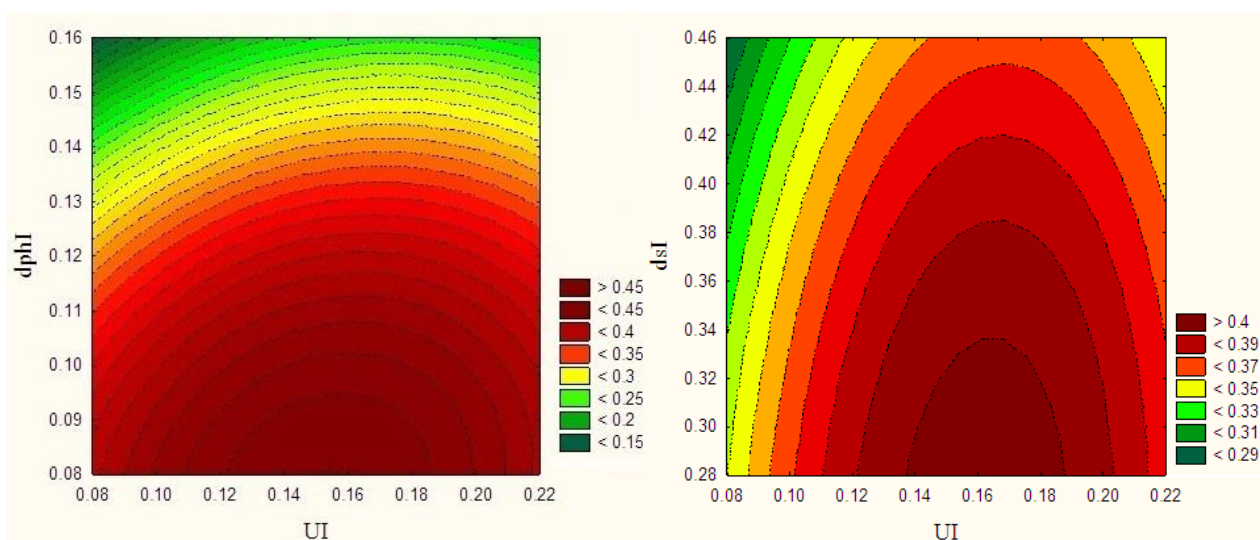


Рисунок 5 - Карти ліній рівня (поверхонь відгуку) для вихідного параметра адиабатний ККД для однопотокової проточної частини.

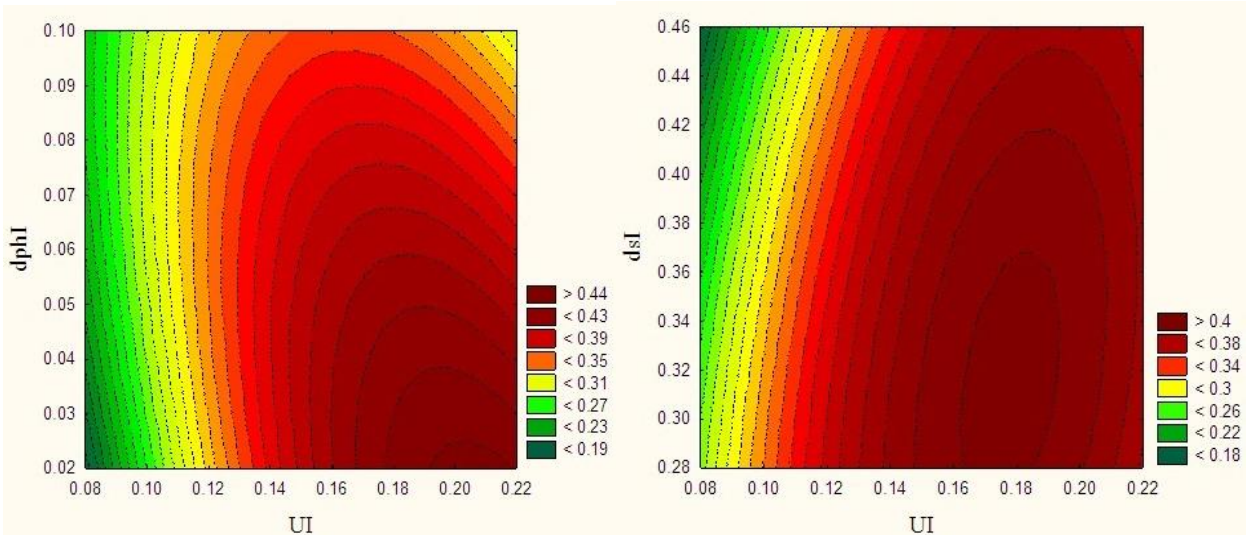


Рисунок 6 - Карті ліній рівня (поверхонь відгуку) для вихідного параметра адіабатний ККД для трьохпотокової проточної частини.

Для багатопотокових схем додатково введено безрозмірний параметр \bar{L}_p , який пов'язує довжину проточної частини в окружному напрямку для одного потоку з довжиною кола меридіонального перерізу.

$$\bar{L}_p = \frac{L_p}{l_{ph}} = \frac{\pi \cdot D}{i \cdot \pi \cdot d_k} = \frac{D}{i \cdot d_k}$$

Узагальнені оптимальні значення параметру \bar{L}_p для трьох схем вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом становить $\bar{L}_p = 8 \dots 11$. При цьому для досягнення максимального ККД рекомендується (рис. 1): відносний крок лопаток $\bar{t} = 1.1 \dots 1.3$, кут установки лопаток $\beta_y = -10$ град, кут нахилу лопатки $\beta = 35$ град, максимальне зміщення осі сопла по ширині колеса.

У третьому розділі з метою отримання характеристик і підтвердження адекватності математичної моделі за результатами теоретичних досліджень та верифікації розробленої методики розрахунку вихрової розширювальної машини були проведені фізичні експерименти на створеному на кафедрі технічної теплофізики Сумського державного університету стенді, який дозволяє проводити випробування різних типів розширювальних машин з різними типами електрогенераторів потужністю до 15 кВт. Прилади та обладнання стенду дозволяють змінювати електричне навантаження та параметри робочого тіла на вході та виході розширювальної машини для отримання необхідних параметрів і характеристик турбогенератора і вихрової розширювальної машини.

Створено експериментальну модель вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом і турбогенератор на її основі (рис. 7). Конструкція машини дозволяє досліджувати вплив основних геометричних параметрів проточної частини на її ефективність:

а) кута входу потоку газу, що витікає з сопла, на лопатки робочого колеса (кута між віссю сопла і дотичній до зовнішнього діаметру робочого колеса);

б) діаметра сопла, що дозволяє змінювати витрату і швидкості на виході з сопла, а також - відношення площі сопла до площі меридіонального перерізу проточної частини, за рахунок чого можливе підкручення потоку на вхідній ділянці проточної частини;

в) діаметра і типу меридіонального перерізу проточної частини, що дозволяє змінювати і досліджувати вплив відношення діаметра меридіонального перерізу проточної частини до зовнішнього діаметра робочого колеса, а також типу меридіонального перерізу проточної частини на ефективність машини.

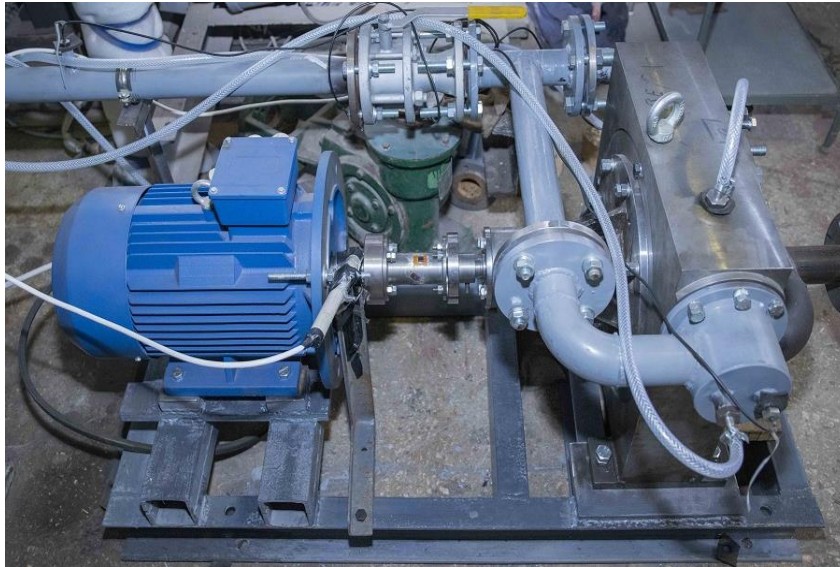


Рисунок 7 – Турбогенератор на основі вихрової розширювальної машини

Конструкція стенду дозволяє регулювання тиску газу на вході та виході ВРМ, а також частоти обертання та моменту на валу розширювальної машини для визначення оптимальних, з точки зору гідравлічного ККД, значень наведеної колової швидкості та інших параметрів і характеристик ВРМ.

Для визначення потужності та ККД вихрової машини автором було створено бездротовий датчик крутного моменту (тензометричну муфту ТМ100). Масогабаритні характеристики муфти практично не відрізняються від характеристик стандартних муфт для передачі крутного моменту. Створена муфта здатна працювати при високих частотах обертання ротора турбомашини. Муфта задовольняє вимогам по похибці вимірювання, за діапазоном вимірювання і по можливості спільної роботи з іншими датчиками при випробуваннях. Створено власне програмне забезпечення, яке дозволяє налаштовувати візуалізацію і зберігання даних в зручному для дослідника вигляді. На основі тензометричної муфти і програмного забезпечення створена інформаційно-вимірювальна система для вимірювання крутного моменту на валах, що обертаються, яка, в порівнянні з відомими аналогічними, має компактну і зручну в роботі конструкцію з мінімальною кількістю елементів.

Для забезпечення контролю обладнання стенду та автоматизації реєстрації параметрів ВРМ в процесі випробувань автором було створено інформаційно-вимірювальну систему стенду, яка складається з програмного забезпечення, контролерів та датчиків.

В результаті експериментальних досліджень отримано характеристики оптимізованої проточної частини та підтверджено результати обчислювального експерименту. Порівнюючи експериментальні характеристики з розрахованими по створеній методиці ми бачимо гарне співпадіння результатів (рис. 8). Порівнюючи

характеристики оптимізованої проточної частини з прототипом бачимо, що вдалося підвищити ККД з рівня 30 % до рівня більше 45 %.

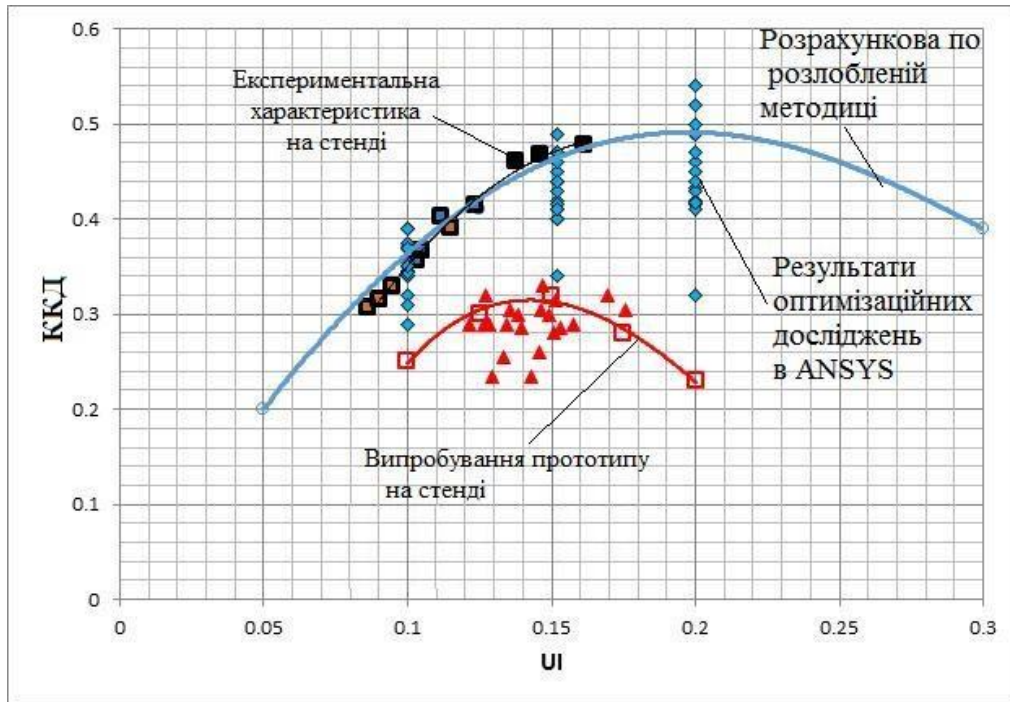


Рисунок 8 – Залежності ККД вихрової розширювальної машини від наведеної колової швидкості, отримані в результаті досліджень.

Розраховано похибки прямих і непрямих вимірювань, які показують, що методика проведення експериментальних досліджень і методика обробки результатів дослідних даних, що застосовуються, забезпечують отримання достовірних експериментальних даних із припустимою точністю при проведенні технічного експерименту.

Використовуючи результати теоретичних та експериментальних досліджень були визначені значення емпіричних коефіцієнтів a_i в рівнянні для визначення ККД проточної частини $\eta_{пч}$ та b_i в рівнянні для визначення коефіцієнта активності проточної частини за ізоентропними перепадами ентальпії β_s вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом для двопотокової схеми:

$$\eta_{пч} = a_0 + a_1 \cdot \alpha_{ns} + a_2 \cdot \bar{U} + a_3 \cdot \overline{d_{пр.ч}} + a_4 \cdot \overline{d_s} + a_5 \cdot \alpha_{ns}^2 + a_6 \cdot \bar{U}^2 + a_7 \cdot \overline{d_{пр.ч}}^2 + a_8 \cdot \overline{d_s}^2;$$

Емпірично визначені коефіцієнти a_i :

$$a_0 = -1.419208; a_1 = 0.030558; a_2 = 8.133333; a_3 = 2.016667; a_4 = 2.853333; a_5 = -0.000334; a_6 = -24.00000; a_7 = -18.75000; a_8 = -4.400000.$$

$$\beta_s = b_0 + b_1 \cdot \alpha_{ns} + b_2 \cdot \bar{U} + b_3 \cdot \overline{d_{пр.ч}} + b_4 \cdot \overline{d_s} + b_5 \cdot \alpha_{ns}^2 + b_6 \cdot \bar{U}^2 + b_7 \cdot \overline{d_{пр.ч}}^2 + b_8 \cdot \overline{d_s}^2;$$

Емпірично визначені коефіцієнти b_i :

$$b_0 = 1.99041667; b_1 = -0.0485000; b_2 = -0.5833333; b_3 = 1.4722222; b_4 = -1.677778; b_5 = 0.0004875; b_6 = 6.000000; b_7 = -1.3888889; b_8 = 0.0;$$

У четвертому розділі розроблена методика розрахунку параметрів та характеристик вихрових розширювальних машин і пневмоагрегатів на їх основі. Розроблено рекомендації, спрямовані на забезпечення роботи агрегатів, створених на основі вихрових розширювальних машин, в зоні максимальної ефективності в діапазоні зміни ступеня зниження тиску $\Pi_T=1,2-6$. Визначено області їх раціонального використання за основними критеріальними комплексами, загально визначеними в теорії і практиці турбомашин: приведеною коловою швидкістю робочого колеса \bar{U} , приведеною частотою обертання (коефіцієнтом швидкохідності) n_s , приведеним діаметром D_s , коефіцієнтом витрати Φ_2 , коефіцієнтом комплексної потужності $N_{\text{компл}}$.

На рис. 9 показана поєднана n_s , D_s -діаграма для вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом і класичних (радіальних та осьових) розширювальних турбомашин. Видно, що вихрові розширювальні машини займають свою область лівіше і вище класичних (радіальних та осьових) розширювальних турбомашин.

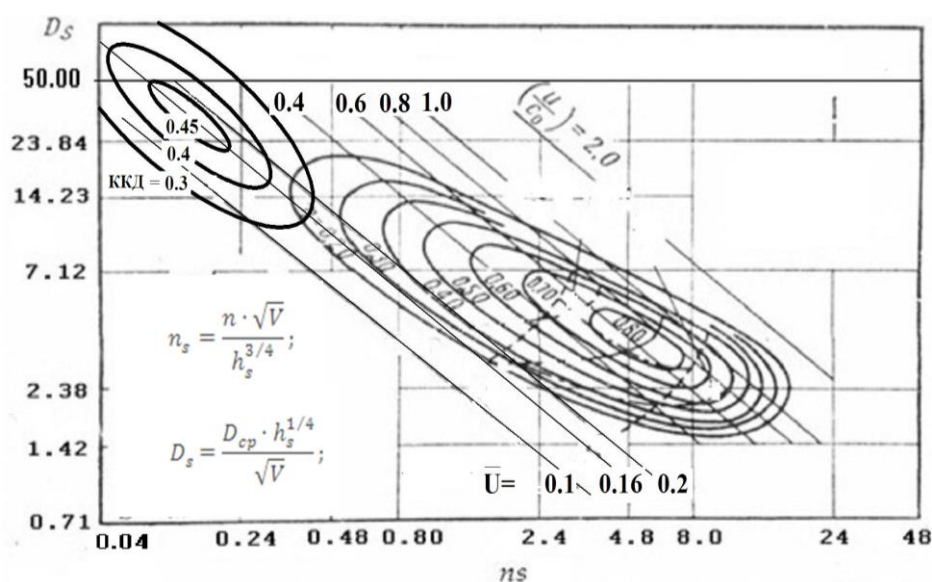


Рисунок 9 – Поєднана для класичних (радіальних та осьових) і вихрових розширювальних турбомашин n_s , D_s - діаграма.

Проведено порівняння характеристик маловитратних розширювальних турбомашин різних типів по ряду критеріальних комплексів. На рис. 10 представлені залежності ККД одноступінчатих розширювальних турбомашин різних типів в залежності від наведеної колової швидкості робочого колеса. З рис. 10 видно, що в діапазоні $\bar{U}=0,1-0,2$ вихрові розширювальні машини можуть мати більший ККД, ніж розширювальні машини інших типів, при меншій в кілька разів частоті обертання ротора.

З точки зору радіальних сил вихрові однопотокові ступені з розташуванням робочого колеса безпосередньо на валу стандартного електрогенератора можна використовувати до тиску газу на вході 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 схеми, оптимальні значення приведеної окружної швидкості. Для

утилізаційних детандерних установок малої потужності застосування двопотокової схеми найбільш доцільно, бо при такій схемі вдається врівноважити радіальні сили більш простою і компактною конструкцією.

Сформовані та обґрунтовані шляхи подальшого удосконалення вихрових розширювальних машин і установок на їх основі.

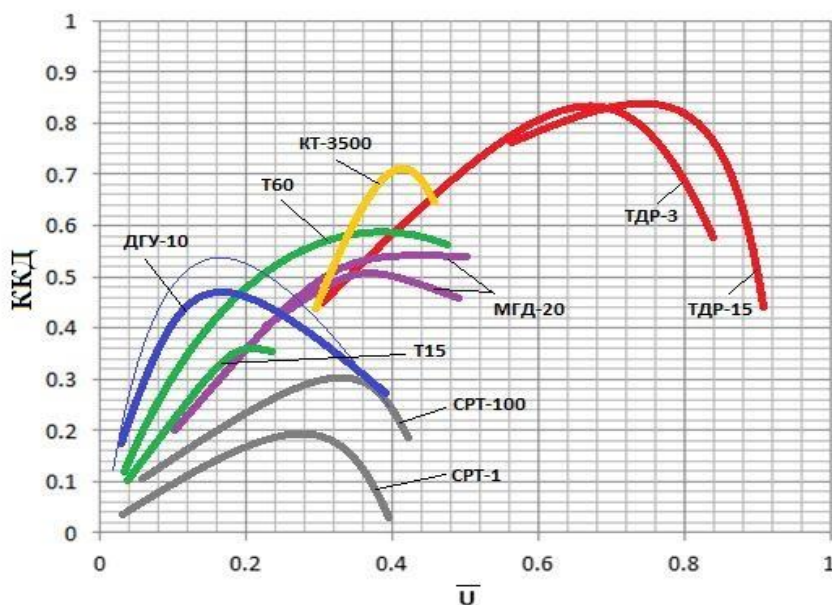


Рисунок 10 – Залежності ізоентропного ККД від наведеної колової швидкості робочого колеса для різних типів розширювальних турбомашин.

(ДГУ-10 – вихрова РМ потужністю 10 кВт, СРТ-1 - струминно-реактивна РМ потужністю 1 кВт, СРТ-100 - струминно-реактивна РМ потужністю 100 кВт, Т15 - радіальна відцентрова РМ потужністю 15 кВт, Т60 - радіальна доцентрова РМ потужністю 60 кВт, КТ3500 - радіальна доцентрова РМ потужністю 35 кВт, МГД – 20 осьова РМ потужністю 20 кВт, ТДР-3 - радіальна доцентрова РМ потужністю 37 кВт, ТДР-15 - радіальна доцентрова РМ потужністю 81 кВт).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача підвищення ефективності і надійності пневмоагрегатів на основі вихрових розширювальних машин та визначення області їх раціонального застосування.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Обґрунтовано доцільність застосування агрегатів на основі вихрових розширювальних машин потужністю до 500 кВт. Визначено області їх раціонального використання за основними критеріальними комплексами, загально визначеними в теорії і практиці турбомашин: за приведеною частотою обертання (коефіцієнтом швидкохідності) $n_s=0,04...0,24$, за приведеним діаметром $D_s=15...50$, за наведеною окружною швидкістю робочого колеса $\bar{U}=0,14...0,18$. Вихрові розширювальні машини можуть працювати з високим ККД (більше 45 %) при коефіцієнті витрати $\Phi_2 < 0,02$. За коефіцієнтом комплексної потужності вихрові розширювальні машини однозначно є малопотужними, маловитратними машинами і працюють з оптимальними ККД в області $N_{\text{компл}}=0,004...0,1$, в якій ККД класичних (доцентрових і осьових) розширювальних машин на 20% нижче.

Порівняння характеристик маловитратних розширювальних турбомашин радіального, осьового і вихрового типів по ряду критеріальних комплексів показало, що найбільш перспективним є використання вихрових розширювальних машин для створення тихохідних (з частотою обертання 3000 об/хв) турбогенераторів і турбоприводів відносно невеликої потужності (до 500 кВт) з терміном окупності 1-2 роки.

2 Розроблено та верифіковано за експериментальними даними методику розрахунку течії газу у проточній частині вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом у програмному комплексі ANSYS.

3. Вперше розроблено параметричну модель багатопотокової вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом і методику чисельного дослідження її в програмному комплексі ANSYS, що дозволило досліджувати вплив геометричних і газодинамічних параметрів на її ефективність і характеристики; сплановано з застосуванням теорії планування експерименту обчислювальний експеримент з вибором значущих факторів і діапазонів їх зміни та проведено оптимізаційні дослідження за допомогою програмно-обчислювального комплексу ANSYS з метою досягнення максимального ККД за рахунок оптимізації геометричних розмірів проточної частини.

Дослідження у програмному комплексі ANSYS показало, що

– поздовжньо-вихрова течія є базовою при передачі енергії від робочого тіла лопаткам робочого колеса і чим краще організована ця течія, тим вище ККД машини;

– застосування двопотокової схеми дозволяє більш ефективно використовувати довжину проточної частини і компенсувати радіальні навантаження на опори, що сприяє підвищенню ККД і надійності роботи вихрової розширювальної машини;

– оптимальні значення ККД вихрової двопотокової машини із зовнішнім периферійним каналом можна підвищити більш ніж на 15% (з рівня 30% до рівня більш 45%);

– з точки зору радіальних сил вихрові однопотокові ступені можна використовувати до тиску газу на вході 1.2 ... 1.8 МПа, а при більш високих вхідних тисках необхідно використовувати багатопотокові схеми. У порівнянні з трьохпотоковою двопотокова схема має більш просту конструкцію і менші, ніж у трьохпотокової, оптимальні значення приведеної окружної швидкості \bar{U} . Для утилізаційних детандерних установок малої потужності застосування двопотокової схеми найбільш доцільно, бо при такій схемі вдається врівноважити радіальні сили більш простою і компактною конструкцією;

– отримані діапазони зміни значущих факторів для зони максимального ККД для однопотокових, двопотокових і трьохпотокових проточних частин вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом;

– отримані залежності ККД проточної частини вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом від значущих факторів:

$$\eta_{пч} = a_0 + a_1 \cdot \alpha_{ns} + a_2 \cdot \bar{U} + a_3 \cdot \overline{d_{пр.ч}} + a_4 \cdot \overline{d_s} + a_5 \cdot \alpha_{ns}^2 + a_6 \cdot \bar{U}^2 + a_7 \cdot \overline{d_{пр.ч}}^2 + a_8 \cdot \overline{d_s}^2$$

4. Створено експериментальну модель вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом, турбогенератор на її основі і експериментальний

стенд для дослідження вихрових розширювальних машин та агрегатів на їх основі. Конструкція машини дозволяє досліджувати вплив основних геометричних параметрів проточної частини на ефективність вихрової розширювальної турбомашини і турбогенератора в цілому. Для забезпечення контролю обладнання стенду та автоматизації реєстрації параметрів вихрової розширювальної машини в процесі випробувань створено інформаційну вимірювальну систему, яка складається з програмного забезпечення, контролерів та датчиків.

Для визначення потужності та ККД вихрової машини створений бездротовий датчик крутного моменту (тензометричну муфту ТМ100). На основі тензометричної муфти і розробленого програмного забезпечення створена інформаційно-вимірювальна система для вимірювання крутного моменту на валах, що обертаються, яка в порівнянні з відомими має компактну і зручну в роботі конструкцію з мінімальною кількістю елементів.

В результаті експериментальних досліджень отримано характеристики оптимізованої проточної частини та підтверджено результати обчислювального експерименту. В результаті досліджень вдалося підвищити ККД вихрової машини з зовнішнім периферійним каналом з рівня 30 % до рівня більше 45 %.

5. Розроблена методика розрахунку параметрів одно та багатопотокової проточної частини вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом.

6. Розроблено рекомендації, спрямовані на забезпечення роботи агрегатів, створюваних на основі вихрових розширювальних машин, в зоні максимальної ефективності в діапазоні зміни ступеня зниження тиску $\Pi_T=1,2-6$ для:

- однопотокової схеми – $\bar{U}=0,12\dots0,18$, $\bar{a}_{\text{пр.ч}}=0,08\dots0,10$;
- двопотокової схеми – $\bar{U}=0,15\dots0,19$, $\bar{a}_{\text{пр.ч}}=0,05\dots0,07$;
- трьохпотокової схеми – $\bar{U}=0,18\dots0,22$, $\bar{a}_{\text{пр.ч}}=0,02\dots0,04$.

Для багатопотокових схем додатково введено безрозмірний параметр (\bar{Lp}), який пов'язує довжину проточної частини в окружному напрямку для одного потоку з довжиною кола меридіонального перерізу проточної частини.

Отримано узагальнені оптимальні значення параметрів для трьох схем вихрових розширювальних машин із зовнішнім периферійним каналом в діапазоні ступеня зниження тиску $\Pi_T = 1,2-6$: $\bar{a}_s=0,28\dots0,38$, $\alpha_{ns}=25\dots45$ град, $\bar{Lp}=8\dots11$. При цьому для досягнення максимального ККД відносний крок лопаток рекомендується прийняти $\bar{t}=1,1\dots1,3$, кут установки лопаток рекомендується прийняти рівним мінус 10 град, кут нахилу лопатки рекомендується прийняти рівним 35 град, зміщення осі сопла рекомендується виконувати максимальним.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Мирошніченко Д.В. Исследование вихровой расширительной машины с внешним периферийным каналом с помощью виртуального стенда [Текст] / С.М. Ванев, Д.В. Мирошніченко // Журнал інженерних наук. - 2015. - Т.2; №2. - С.В1-В12.

2. Мирошніченко Д.В. Исследование и оптимизация конструкции проточной части вихровой расширительной машины с внешним периферийным каналом /

С.М. Ванеєв, Д.В. Мирошніченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение: научно-технический и производственный журнал. – 2015. – №4(42). – С. 9-14.

3. Мірошніченко Д.В. Визначення області раціонального застосування вихрових розширювальних турбомашин з використанням критеріальних комплексів / С. М. Ванеєв, Д. В. Мірошніченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 66–74. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.09 (входить до бази даних Ulrich's Periodicals Directory американського видавництва Bowker; індексується в онлайнній наукометричній базі даних Index Copernicus).

4. Miroshnichenko D. Research of multi-flow and multi-channel flow parts of the vortex expansion machines with the external peripheral channel/ S. Vaneev, D. Miroshnichenko, S. Meleychuk, V. Baga // IOP: Materials Science and Engineering 233 (2017) 012020 doi:10.1088/1757-899X/233/1/012020 (індексується науковою базою даних Scopus).

5. Мірошніченко Д.В. Стенд для дослідження розширювальних турбомашин малої потужності та агрегатів на їх основі / С. М. Ванеєв, Д. В. Мірошніченко, В.О. Журба, Я.В. Знаменщиков, В.М. Бага, Т.С. Родимченко. // Холодильна техніка та технологія. – 2019. - № 55(1). – С. 15-21.

6. Miroshnichenko D.V. Generation of data measuring system for torque measurement on running shafts using a non-contact torsional dynamometer / Vanyeyev S.M., Miroshnichenko D.V., Rodymchenko T.S., Protsenko M., Smolenko D.V. // JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES. – 2019 - Volume 6, Issue 2 (2019) - pp. E 17–E 23.

7. Патент України № 136761, МПК F01D1/08, F04D17/06. Вихрова розширювальна турбомашина / С.М. Ванеєв, Д.В. Мірошніченко. – Надрук. 27.08.2019, Бюл. № 16.

8. Мірошніченко Д.В. Применение детандер-генераторов на основе вихревых расширительных машин в качестве источника электроэнергии на компрессорных станциях / Д.В. Мірошніченко, С.М. Ванеєв, И.И. Сидорец // Труды XVII Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. – Казань: Изд-во «Слово», 2017. – С. 278-283.

9. Мірошніченко Д.В. Анализ результатов экспериментальных исследований вихровой турбины с периферийно-боковым каналом [Текст] / Д.В. Мірошніченко, С.М. Ванеєв, С.В. Ладенко // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, Суми, 18-22 квітня 2011 року / Ред. кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. — Суми : СумДУ, 2011. — Ч.3. — С. 33.

10. Мірошніченко Д.В. Исследование и совершенствование конструкций вихревых турбин с помощью виртуального стенда / Мірошніченко Д. В., Ванеєв С. М. // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса: ОНАХТ, 2015. – С. 145-147.

11. Мирошниченко Д.В. Оптимизация параметрической модели проточной части двухпоточной вихревой расширительной машины / Мирошниченко Д.В., Ванеев С.М. // XVI Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика», м. Суми, 14-16 жовтня 2015 р.: матеріали конференції. – Вінниця: Вид-во «ГЛОБУС-ПРЕС», 2015. – С. 162-163.

12. Мирошниченко Д.В. Определение оптимальных компоновочных схем проточных частей вихревых расширительных машин с внешним периферийным каналом [Текст] / С.М. Ванеев, Д.В. Мирошниченко // Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, м. Суми, 17-20 травня 2016 р. / Ред.кол.: О.Г. Гусак, К.О. Дядюра. - Суми : СумДУ, 2016. - С. 125.

13. Мирошниченко Д.В. Влияние продольно- вихревого течения на КПД проточной части расширительной машины с внешним периферийным каналом [Текст] / С.М. Ванеев, Д.В. Мирошниченко // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 19-22 квітня 2016 р.: у 2-х ч. / Редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. - Суми: СумДУ, 2016. - Ч.2. - С. 196.

14. Мирошниченко Д.В. Разработка испытательного модельного стенда для исследований вихревых турбомашин / С.М. Ванеев, Д.В. Мирошниченко //XXI Міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Київ, 24-27 травня 2016 р.):.- Київ, 2016.– С. 166.

15. Мирошниченко Д.В. Исследование возможности применения многопоточных проточных частей вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом / С.М. Ванеев, Д.В. Мирошниченко // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 18-21 квітня 2017 р.: у двох частинах / Редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. — Суми : СумДУ, 2017. — Ч.2. — С. 33.

16. Мирошниченко Д.В. Расчет турбогенератора для собственных нужд ГРС на базе вихревой расширительной турбомашины / С.М. Ванеев, Д.В. Мирошниченко // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 18-21 квітня 2017 р.: у двох частинах / Редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. — Суми : СумДУ, 2017. — Ч.2. — С. 36.

17. Мирошниченко Д.В. Исследование влияния угла наклона сопла двухпоточной вихревой турбины с внешним периферийным каналом на ее эффективность / С.М. Ванеев, Д.В. Мирошниченко // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології: збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Одеса, 21-22 вересня 2017 р. – Одеса: ОНАХТ, 2017.- С. 206-207.

18. Мірошниченко Д.В. Виготовлення стенду дослідження турбогенераторів малої потужності для утилізації енергії стиснутих газів / Ванєєв С. М., Мірошниченко Д.В., Бондар А.В. // Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 19-22 червня 2018 р.):.- Київ, 2018.– С. 191-193.

19. Мірошніченко Д.В. Дослідження робочого процесу вихрової розширювальної машини з бічним каналом / Ванєєв С. М., Бондар А.В., Мірошніченко Д.В. // Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 19-22 червня 2018 р.):.- Київ, 2018.– С. 173-174.

20. Мірошніченко Д.В. Устройство для определения крутящего момента и мощности на валу вихревой расширительной машины / Ванєєв С. М., Мірошніченко Д.В. // Матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (Суми, 17-20 квітня 2018 р.)– Суми : СумДУ, 2018. – С. 308

21. Мірошніченко Д.В. Енергетична установка на базі струминного термокомпресорного модуля і вихрової розширювальної турбомашини / Арсенєв В.М., Ванєєв С. М., Мірошніченко Д.В., Чех О.Ю. // XIX Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика», м. Львів, 25-28 вересня 2018 р.: матеріали конференції. – Вінниця: Вид-во «ГЛОБУС-ПРЕС», 2018. – С. 38.

АНОТАЦІЯ

Мірошніченко Д.В. Підвищення енергоефективності пневмоагрегатів, створюваних на основі вихрових розширювальних машин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Сумський державний університет МОН України, Суми, 2019.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності та надійності, визначенню області раціонального застосування пневмоагрегатів на основі вихрових розширювальних машин. Розроблено параметричну модель, методику експериментального та чисельного оптимізаційного дослідження багатопотокової вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом. Виконана багатокритеріальна оптимізація, яка дозволяє знайти геометричні параметри проточної частини, які забезпечують максимальний ККД, що дало змогу підвищити більш ніж на 15% (з рівня 30% до рівня більш 45%) оптимальні значення ККД вихрової двухпоточної розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом. Створено експериментальну модель вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом, турбогенератор на її основі і експериментальний стенд для дослідження вихрових розширювальних машин та агрегатів на їх основі. В результаті експериментальних досліджень отримано характеристики оптимізованої проточної частини та підтверджено результати обчислювального експерименту.

В результаті досліджень встановлено вплив геометричних і газодинамічних параметрів на картину течії в проточній частині вихрової розширювальної машини з периферійним каналом. Встановлені основні значущі геометричні та газодинамічні співвідношення параметрів проточної частини вихрової розширювальної машини, визначений ступінь їх впливу на характеристики машини. Обґрунтовано доцільність застосування агрегатів на основі вихрових розширювальних машин потужністю до

500 кВт. Визначено області їх раціонального використання за основними критеріальними комплексами, загально визначеними в теорії і практиці турбомашин.

Ключові слова: вихрова розширювальна машина, планування експерименту, оптимізація, енергоефективність, пневмоагрегат.

АНОТАЦІЯ

Miroshnichenko D.V. Energy efficiency upgrading of pneumatic units created on the basis of vortex expansion machines. – The manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering Science in Specialty 05.05.17 - hydraulic machines and hydropneumatic units. - Sumy State University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Sumy, 2019.

The dissertation is devoted to raising of the efficiency and reliability, determination of area of rational application of pneumatic units on the basis of vortex expansion machines. A parameter-oriented model, technique of experimental and numerical optimization study of a multithreaded vortex expansion machine with an external peripheral channel has been developed. Planned (using the experimental design theory) and carried out computational experiments, the results of which performed multi-objective optimization, have made it possible to find geometrics of flowing sections and their ratios, providing the maximum adiabatic (isentropic) efficiency of multithreaded vortex expansion machines with an external peripheral channel. The optimum values of the efficiency of the vortex double-stream machine with an external peripheral channel have been successfully increased by more than 15% (from 30% to more than 45%). The test facility for the study of vortex expansion machines of low power (up to 15 kW), an experimental model of the double-stream vortex expansion machine and the data measuring system of the test facility has been created. As a result of the experimental studies, the characteristics of the optimized flowing section were obtained. The results of experimental studies of the vortex expansion machine have verified the results of the computational experiment. As a result, the influence of geometrical and gas-dynamic parameters on the flow pattern in the flow path of vortex expansion machine with a peripheral channel was established. The most influential factors on machine efficiency are identified and the ranges of their variations are determined.

The feasibility of using units based on vortex expansion machines with capacity up to 500 kW have been substantiated. Areas of their rational use with the basic criteria complexes, generally recognized in the theory and practice of turbomachines have been determined.

Keywords: vortex expansion machine, experimental design, optimization, energy efficiency, pneumatic unit.

Підписано до друку 12.11.2019 р

Формат 60x84/16 Ум. друк. арк.1,1. Обл.-вид.арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам.№913

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК№3062 від 17.12.2007р.