

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

Гетало Віктор Валерійович

УДК 620.97

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ РЕДУКУВАННЯ ТИСКУ ШЛЯХОМ  
ВИКОРИСТАННЯ СТРУМИННО-РЕАКТИВНИХ ПНЕВМОАГРЕГАТИВ**

05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2014

**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, професор  
**КОНОНЕНКО Анатолій Петрович**,  
Державний вищий навчальний заклад  
"Донецький національний технічний університет",  
завідувач кафедри "Енергомеханічні системи"

кандидат технічних наук  
**МАРЦИНКОВСЬКИЙ Василь Сігізмундович**,  
ТОВ “ТРИЗ”, м. Суми,  
директор

Захист відбудеться «03» жовтня 2014 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Р. - Корсакова, 2, СумДУ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий: «02» вересня 2014 р.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* На сьогоднішній день у світі вирішення проблеми енергозбереження всіма можливими шляхами є актуальним і першочерговим завданням. Безумовно, уряд України також стурбований цією глобальною проблемою, про що свідчить створення програми «Енергетична стратегія України на період до 2030 р.» Цілями даної програми є зниження питомих витрат на виробництві та раціональне використання енергопродуктів шляхом впровадження енергозберігаючих технологій та обладнання. У 2010 році створено програму «Державна цільова економічна програма енергоефективності на 2010-2015 роки», метою якої є оптимізація енергетичного комплексу України і стимулювання підвищення використання вторинних енергоресурсів.

Одним із шляхів вирішення проблеми енергозбереження є використання (утилізація) вторинних енергоресурсів. Велика кількість ексергії стислих газів втрачається на вузлах редукування в різних галузях промисловості. В газовій галузі до систем редукування тиску належать: промислові газорегулюючі станції, газорозподільчі станції (ГРС) та пункти (ГРП), які приймають газ з декількох магістральних газопроводів і забезпечують його подачу безпосередньо споживачам.

Одним з найбільш важливих аспектів цієї проблеми є те, що ГРС та ГРП являють собою порівняно прості технологічні об'єкти, обладнанні простою системою зниження тиску газу – регуляторами тиску. Якісною альтернативою регуляторам тиску є утилізуючі системи, що базуються в основному на турбодетандер-електрогенераторних установках і агрегатах. Дані системи забезпечують одночасно зниження і регулювання тиску газу при його розширенні в турбодетандері, а також отримання механічної роботи на валу з перетворенням її в електроенергію.

За статистичними даними в Україні з 1450 функціонуючих ГРС тільки на 50 можливе отримання корисної потужності більше 2,5 МВт. На цих ГРС застосовуються турбодетандерні агрегати на основі осьових і доцентрових розширювальних машин потужністю більше 1 МВт. Агрегати меншої потужності на основі цих машин будуть складними і дорогими.

З урахуванням викладених аспектів запропоновано в діапазоні потужностей до 500 кВт використовувати струминно-реактивні пневмоагрегати (пневмоагрегати з розширювальною машиною струминно-реактивного типу). Ці агрегати прості по конструкції з можливістю освоєння звичайним виробництвом, надійні в експлуатації, стійкі до ерозійного зносу та гідратуутворення, а також дозволяють отримувати додаткову електроенергію.

Виходячи з усього вищевикладеного, тема дослідження є актуальною, оскільки величезний потенціал для вирішення проблеми енергозбереження закладений в утилізації вторинних енергоресурсів. Створення утилізуючих струминно-реактивних пневмоагрегатів сприяє вирішенню науково-технічної задачі впровадження надійного, конструктивно простого та енергозберігаючого устаткування в різних галузях промисловості, зокрема, на газорозподільчих станціях і пунктах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету відповідно до науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України. Здобувач був виконавцем державної науково-дослідної роботи № 0110U004210 «Дослідження робочих процесів енергетичних машин». Також наукові розробки та дослідження в роботі виконані відповідно до "Державної науково-технічної програми та наукової частини державних цільових програм у сфері енергозбереження" №1205020 за темою "Розробка дослідного зразка газового турбодетандер-електрогенераторного агрегату потужністю 100/130 кВт на базі струминно-реактивної турбіни (ТДА-СРТ-100/130)».

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – підвищення енергоефективності системи редукування тиску шляхом використання струминно-реактивного пневмоагрегату і уточнення його робочого процесу.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі дослідження:

- обґрунтувати доцільність застосування струминно-реактивних пневмоагрегатів в якості утилізуючих установок у системах редукування тиску;
- обґрунтувати характер і встановити особливості процесів, що протікають в струминно-реактивній розширювальній машині, а також уточнити математичну модель течії газу в проточній частині;
- провести чисельні дослідження струминно-реактивного пневмоагрегату за допомогою програмно-обчислювальних комплексів, з метою відпрацювання методики розрахунку течії газу та порівняння з експериментальними даними;
- провести експериментальні дослідження струминно-реактивного пневмоагрегату з метою отримання характеристик і визначення факторів, які впливають на його роботу, а також підтвердження адекватності математичної моделі за результатами теоретичних досліджень;
- розробити рекомендації, спрямовані на забезпечення роботи пневмоагрегату в зоні максимальної ефективності за результатами теоретичних та експериментальних досліджень, а також впровадити отримані результати в навчальний процес і на промисловому підприємстві.

**Об'єкт дослідження.** Робочі процеси, що протікають в струминно-реактивній розширювальній машині та агрегатах на її основі.

**Предмет дослідження.** Параметри і характеристики струминно-реактивної розширювальної машини та агрегатів на її основі.

**Методи дослідження.** Для дослідження струминно-реактивної розширювальної машини використовувалися методи математичного та фізичного моделювання. 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 моделювання течії газу в струминно-реактивному пневмоагрегаті використовувався програмно-обчислювальний комплекс *FlowVision*. Фізичний експеримент містить дослідження струминно-реактивної розширювальної машини та дослідно-промислового зразка пневмоагрегату на її основі.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- встановлено, що для підвищення ефективності розширювальної машини струминно-реактивного типу і агрегатів на її основі потік газу на вході в ротор машини повинен мати мінімально можливу надзвукову швидкість, оскільки втрати повного тиску при цьому будуть найменшими;

- уточнена математична модель робочого процесу струминно-реактивної розширювальної машини шляхом урахування коефіцієнта стиснення газу, адекватність якої підтверджується результатами експериментальних досліджень;

- вперше встановлено, що основним геометричним співвідношенням, яке визначає ефективність роботи струминно-реактивного пневмоагрегату, є відношення площин критичних перерізів підвідного і тягових сопел, а також отриманий діапазон оптимальних значень цього співвідношення площин;

- вперше виявлена зона хвильової кризи на профілях тягових консолей робочого колеса при дослідженні характеристик промислового зразка пневмоагрегату ТДА-СРТ-100/130-5,5/0,6ВРД, що дозволило розробити рекомендації, які виключають його роботу в нестійкій зоні;

- вперше із застосуванням програмно-обчислювальних комплексів отримані параметри течії газу і характеристики струминно-реактивного пневмоагрегату, в тому числі із урахуванням опору при обертанні ротора в середовищі в'язкого газу в умовах роботи на газорозподільчій станції.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

- в результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримані практичні рекомендації з вибору основних газодинамічних і геометричних параметрів струминно-реактивної розширювальної машини з максимальними значеннями ККД, що необхідно враховувати при проектуванні нових зразків струминно-реактивних пневмоагрегатів;

- вперше на основі проведених фізичних та чисельних експериментів визначено зони стійкої роботи пневмоагрегату без хвильової кризи, що дозволяє виключити втрати потужності на додатковий опір, тобто отримати максимальне значення ефективності пневмоагрегату. Розроблена методика визначення зони хвильової кризи підтверджена розрахунками та фізичними експериментами;

- розроблена методика проведення чисельних досліджень течії газу в пневмоагрегаті за допомогою програмного комплексу *FlowVision* має практичне значення, оскільки дозволяє скоротити час на проведення досліджень і підвищити їх ефективність;

- основні результати роботи впроваджено в навчальний процес Сумського державного університету в дисциплінах «Пневмодинамічні машини й установки» (для напряму 6.050502 «Інженерна механіка»), «Пневмоагрегати та вакуумна техніка» (для напряму 6.050604 «Енергомашинобудування») і «Розширювальні турбомашини радіального типу» (для спеціальності 7(8).05060405 «Компресори пневмоагрегати і вакуумна техніка»). Також результати впроваджені на підприємстві ТОВ «Укрнафтозапчастина» при проектуванні номенклатурного ряду утилізуючих турбогенераторних агрегатів і парового турбогенератора для систем редукування тиску.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником. У статтях та роботах, опублікованих у виданнях, здобувачу належить наступне.

У роботі [1] здобувач виконав обробку та аналіз результатів експериментальних досліджень. У статтях [2,5] здобувач провів обчислювальні дослідження течії газу в проточній частині струминно-реактивної розширювальної машини на пусковому режимі та на різних частотах обертання ротору, і побудував основні залежності, що характеризують дані режими. В статті [3] здобувач провів аналіз проблеми дослідження, а також прийняв участь у проведенні чисельного експерименту. У роботах [4, 11-16] здобувач виконав чисельні дослідження характеристик СРРМ, за результатами яких побудував основні графічні залежності, а також охарактеризував коло завдань та подальших досліджень. У статтях [6,7] здобувачем проаналізована проблема енергозбереження в газовій галузі, представлені основні рівняння математичної моделі течії газу в проточній частині розширювальної машини і отримані результати експериментальних досліджень промислового зразка пневмоагрегату на її основі. У статті [9] здобувач провів аналіз публікацій по даній тематиці, виклав проблему і зв'язок з науковими та практичними завданнями, а також представив оброблені результати проведених експериментальних досліджень струминно-реактивної розширювальної машини на різних режимах. У роботі [10] здобувач представив оброблені (у вигляді графічних залежностей) результати експериментальних і чисельних досліджень, провів аналіз отриманих результатів, а також представив деякі рекомендації з проектування струминно-реактивної розширювальної машини.

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

- II Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2012 р.);
- VIII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2012 р.);
- VIII Міжнародній науково – технічній конференції «Сталий розвиток і штучний холод» (м. Одеса, 2012 р.);
- науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів СумДУ (м. Суми, 2013 р.);
- XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Кіровоград, 2014 р.);
- III Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2014 р.);

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 10 статей, 6 з яких - у наукових фахових виданнях України (2 статті надруковані в журналі, який входить до бази даних Ulrich's Periodicals Directory американського видавництва Bowker), 1 стаття – у збірнику наукових праць, 3 статті - у зарубіжних виданнях та 6 тез доповідей.

**Структура й обсяг дисертації.** Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 150 сторінок. Дисертаційна робота містить 40 малюнків, 11 таблиць, 4 додатки і список використаних джерел у кількості 136 найменувань на 15 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, а також наукову новизну та практичне значення роботи.

У **першому розділі** розглянуто стан проблеми енергозбереження й виявлено, що величезний потенціал для її вирішення закладений в утилізації вторинних енергоресурсів. На Україні актуальним є питання використання енергії надлишкового тиску газів та пару в усіх галузях промисловості, особливо газовій та хімічній.

У всіх країнах відзначається безперервне зростання виробництва електроенергії. Енергоспоживачі усього світу прогнозують у найближчі 30 років збільшення споживаючих потужностей в два рази. Одне з найважливіших місць відводиться утилізації вторинних енергоресурсів надлишкового тиску, як способу вирішення проблеми енергозбереження і отримання електроенергії на вузлах редукування тиску газу за допомогою детандер-генераторних агрегатів.

Кожен день у всьому світі величезна кількість природного газу транспортується по трубопроводах від джерел до споживачів. Компресори великої потужності, які приводяться в дію, в основному, газотурбінними двигунами, використовуються для стиснення газу з метою його транспортування. Таке ж обладнання використовується в багатьох пунктах (компресорних станціях) по довжині магістрального газопроводу для компенсації втрат тиску газу від тертя. Як тільки газ досягає області розподілу, він, зазвичай, передається від газотранспортної компанії до компанії, яка обслуговує споживачів газу. Оскільки тиск газу значно вищий, ніж потрібно кінцевому споживачеві, то між трубопроводами транспорту газу і мережею його розподілу встановлені так звані газорозподільчі станції (ГРС). ГРС, в основному, складаються з дросельних клапанів і підігрівачів газу. Підігрівач газу необхідний для компенсації температурних втрат у дросельних клапанах. Аналогічні пристрої, звані газорозподільними пунктами (ГРП), зазвичай, встановлюються між мережею розподілу газу та його кінцевими користувачами. Проблема раціонального використання потенційної енергії природного газу, котрий редукується на ГРС і ГРП, виникла з часу становлення газової промисловості.

Одним з найбільш важливих аспектів цієї проблеми є те, що системи редукування (застосовані на ГРС, ГРП) являють собою порівняно прості технологічні об'єкти – регулятори тиску. Якісною альтернативою є впровадження утилізуючих систем. Необхідно відзначити, що турбодетандерні утилізуючі системи на базі класичних лопаткових турбодетандерів (осьових, центробіжних і часто багатоступеневих) перетворюють їх (ГРС, ГРП) в складне енергетичне виробництво, що вимагає постійної присутності кваліфікованого обслуговуючого персоналу. Для газової галузі різних країн це є стримуючим фактором, особливо в

даний час, коли великих капіталовкладень немає. Застосування для малих і середніх ГРС ТДА на основі класичних лопаткових турбодетандерів потужністю менше 500 кВт є неефективним у зв'язку з різким зростанням їх питомої вартості і терміну окупності.

Слід відзначити роботи Агабабова В.С., Корягіна О.В., Гаряева О.А., Соловійова Р.В., Мальханова В.П., Лазарева Л.Я., Чіжова В.В., Савенкова В.Ф., Truston A., Cronin P., Furchner H., Seddig H., Urban M. та ін., де розглянуті та запропоновані утилізуючі установки для систем редукування тиску на основі лопаткових розширювальних машин, що являють собою складні технологічні комплекси великої потужності. Для таких комплексів актуальним є питання підігріву та очищення газу, яке розглянуто в роботах Архарової А.Ю., Жигуліної К.В., Джураєвої К.В., Мальханова О.В. та ін.

Широке впровадження турбодетандерних утилізаційних пневмоагрегатів для середніх і малих ГРС і ГРП можливе тільки на основі рішень, що забезпечують швидко і дешево реконструкцію існуючих систем редукування тиску. Це завдання можна вирішити шляхом застосування пневмоагрегатів малої і середньої одиничної потужності (50 ... 500 кВт), простих і компактних по конструкції, що забезпечують можливість їх установки безпосередньо замість регуляторів тиску або паралельно з ними. Головна проблема при цьому полягає в розширювальній машині (РМ), яка повинна бути проста по конструкції з можливістю виготовлення на звичайному виробництві, надійна в експлуатації, не вимагати складних допоміжних систем, включаючи систему підготовки газу перед РМ, тобто бути стійкою до ерозійного зносу та гідратуутворенню. Адже висока вартість пневмоагрегатів на основі класичних лопаткових турбодетандерів і складність їх експлуатації та ремонту, пов'язані саме з розширювальною машиною. Складна і дорога РМ вимагає відповідних складних допоміжних систем, що забезпечують її надійну роботу і необхідний ресурс: примусова система змащення опор ротора та передавальних муфт; система кінцевих ущільнень вала ротора; система автоматичного управління і регулювання, система контролю та аварійних захистів і, бажано, технічного діагностування; система підготовки газу перед РМ (очищення, осушення, підігріву), бо лопаткові апарати і ущільнення схильні до забруднення, ерозійного зносу та обмерзання.

З урахуванням викладених аспектів запропоновано, в якості альтернативи лопатковим РМ, використовувати струминно-реактивну розширювальну машину (СРРМ) в діапазоні потужностей від 50 до 500 кВт. СРРМ проста по конструкції і може бути освоєна будь-яким виробництвом, у тому числі малими підприємствами. Досвід створення і випробувань СРРМ для приводів шарових кранів показав високу надійність її роботи на непідготовленому природному газі, в тому числі і в екстремальних умовах при роботі на забрудненому, вологому газі при температурі до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

По конструкції вона відноситься до безлопаткових РМ з одиночним подвідним соплом, а за кінематикою потоку - до відцентрових реактивних. Конструктивно СРРМ проста (рисунок 1). Вона містить ротор, що складається з полого вала і робочого колеса, виконаного у вигляді двох або більше радіальних соплових трубок, консольно закріплених на валу, на вільному кінці яких є



тангенціально спрямовані тягові сопла (ТС). Порожнини валу і соплових трубок з'єднані і утворюють безперервний газовий тракт від входу в осьовий канал валу до ТС. СРРМ в даному виконанні, на відміну від лопаткових РМ, взагалі не має швидкозношувальних будь-яких контактних або малозазорних ущільнень. Підведення газу в тракт ротора СРРМ здійснюється за допомогою підвідного сопла (ПС). Потік газу, розширюючись входить до ротора через осьовий зазор, і перекриває його, усуваючи з нього витік робочого тіла. Після стрибка ущільнення потік гальмується і з відносно невеликою швидкістю рухається до ТС, де і відбувається утворення надзвукової течії. При цьому утворюється реактивна сила тяги і крутний момент на валу.

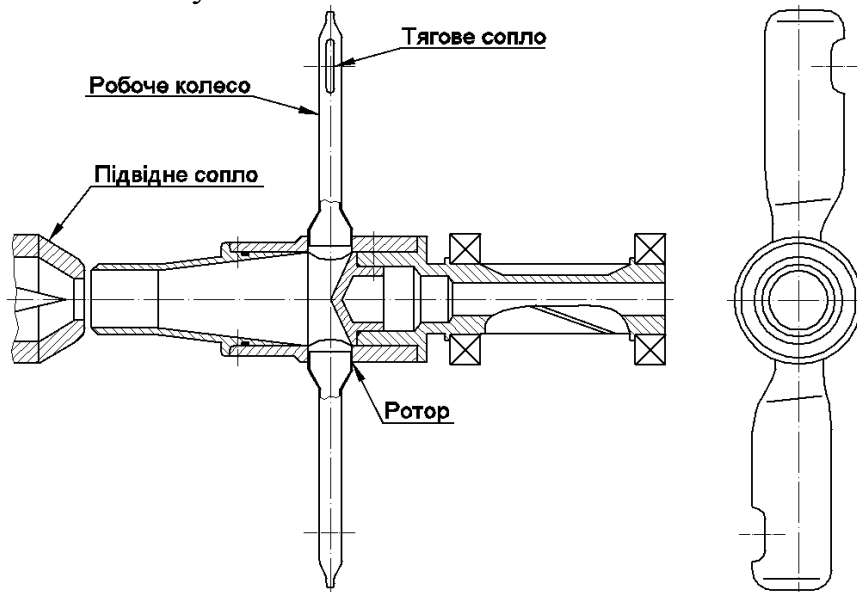


Рисунок 1 – Схема струминно-реактивної розширювальної машини

Таким чином, принцип дії СРРМ полягає в перетворенні потенційної енергії стисненого газу в кінетичну енергію надзвукової течії, яка витікає з тягового сопла. При цьому ефективність процесу перетворення енергії і ефективність (ККД) РМ в цілому зростає при підвищенні тиску і температури газу перед ТС. У зв'язку з цим підводити робоче тіло до тягових сопел потрібно з найменшими втратами енергії (повного тиску) по всій проточній частині СРРМ: від входу в підвідне сопло до входу в тягові сопла.

Для якісного використання пневмоагрегатів зі СРРМ в системах редукування тиску необхідно дослідження робочого процесу, режимів роботи, а також факторів, що впливають безпосереднім чином на характеристики агрегату. Виконаний літературний огляд дозволив чітко сформулювати мету роботи, задачі, які необхідно вирішити для її досягнення.

У другому розділі встановлено характер і особливості процесів, що протікають у розширювальній машині, уточнено математичну модель течії газу в проточній частині шляхом урахування коефіцієнта стиснення та розроблено методика для визначення наявності хвильової кризи при роботі пневмоагрегату.

Для ділянок розширювальної машини з постійною площею поперечного перерізу (це циліндрична ділянка та тягові консолі) теоретичний аналіз проводився з використанням теорії адіабатної течії газу з тертям у трубі.

У розширювальній машині конкретної розглянутої в роботі схеми потік газу на вході в ротор завжди надзвуковий (тобто число Маха > 1). Далі можливі режими течії газу з надзвуковою швидкістю аж до виходу з тракту або з виникненням в деякому місці газового тракту стрибка ущільнення та перехід на дозвукову швидкість. Визначення оптимального режиму роботи є завданням математичного моделювання.

У роботі втрати по довжині газового тракту оцінювалися коефіцієнтом відновлення повного тиску. Коефіцієнт відновлення повного тиску на ділянці 1-2 характеризує втрати повного тиску та розраховується за формулою

$$\sigma_{1-2} = p_{2}^* / p_{1}^*$$

де  $p^*$  - повний тиск.

За результатами розрахунку отримані графіки залежностей зміни коефіцієнта відновлення повного тиску ( $\sigma$ ) по довжині циліндричної ділянки при різних значеннях коефіцієнта швидкості ( $\text{lam}$ ) на вході в ділянку (рисунок 2).

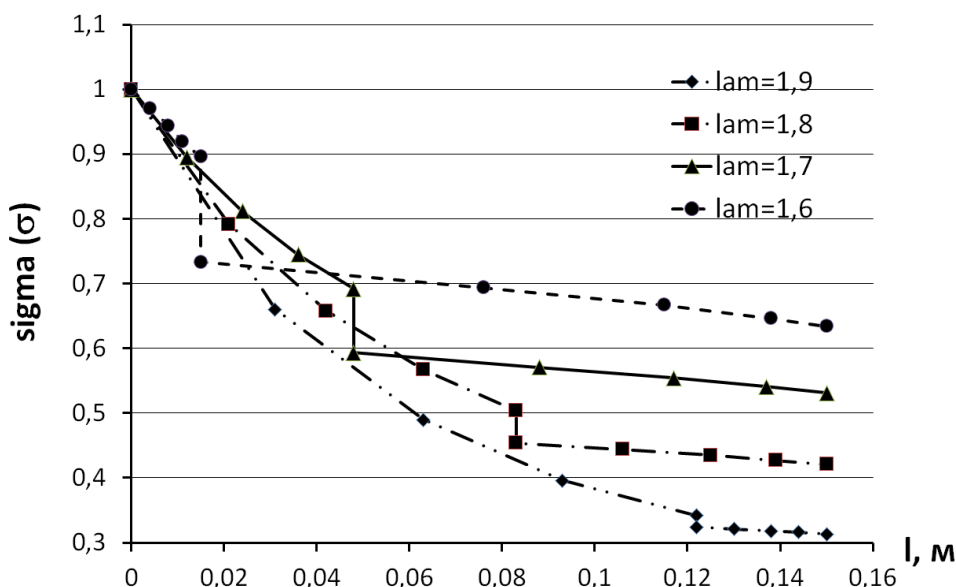


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта відновлення повного тиску від довжини ділянки

Як видно з графіка, чим менше безрозмірна швидкість на вході, тим вище коефіцієнт відновлення повного тиску. Аналіз отриманої залежності показав, що для течії в газовому тракту з обов'язковою надзвуковою швидкістю на вході найбільш вигідним є потік газу з розташуванням стрибка ущільнення безпосередньо після входу в ротор і з мінімальною надзвуковою швидкістю, оскільки втрати будуть найменшими.

У працях Єпіфанової В.І. вводиться і використовується для розрахунку розширювальних машин та турбодетандерів поняття «ідеалізований газ», тобто модель газу, яка враховує властивості реального газу наближено. Для реальних газів існує багато різних форм рівняння стану, які з різним ступенем точності відображають зв'язок між параметрами  $p$ ,  $\rho$  і  $T$ . Природно, що чим простіше структура такого рівняння, тим більше наближеним воно є. Складні за формою рівняння більш точні, однак мало придатні для широкого застосування в розрахунковій практиці. У роботах Єпіфанової В.І. наведено аналіз процесу розширення газу в турбодетандерах високого тиску та показано, що протікає він

при змінюваному в межах 10-12% коефіцієнті стиснення. Для нашого випадку, коли СРРМ використовується як турбодетандер в системах ГРС і ГРП, проведено аналіз величини коефіцієнта стиснення. При тисках газу, що транспортується,  $P = 3,0 \div 5,0$  МПа і температурах  $T = 253 \div 313$  К коефіцієнт стиснення становить близько 0,9. Після розширення коефіцієнт стиснення становить близько 0,97, тобто середнє значення складає 0,935. Виходячи з цього, в математичну модель розрахунку характеристик СРРМ введено постійний коефіцієнт стиснення, який дорівнює середньому для розглянутого процесу значенню  $z=z_{cp}$ , що дозволило уточнити існуючу методику розрахунку характеристик СРРМ. Отже, були прийняті такі припущення:

- застосована модель ідеалізованого газу;
- адіабатний процес течії газу в проточній частині СРРМ;
- поперечний переріз тягового сопла лежить в радіальній площині на відстані  $D/2$  від центру цього перерізу до осі обертання колеса.

На основі рівнянь збереження енергії, нерозривності, кількості руху, стану газу та зміни моменту кількості руху і з урахуванням прийнятих припущень отримана залежність для визначення крутного моменту на валу розширювальної машини:

$$M_T = M_U - M_{o.o.} = R \frac{D}{2} - G_m \omega_P \frac{D^2}{4} - K_{o.o.} \cdot \omega_P^2, \quad (1)$$

де  $M_U$  - момент, визначений по теоремі про зміну моменту кількості руху і зумовлений взаємодією потоку газу з елементами проточної частини розширювальної машини при обертанні робочого колеса;  $M_{o.o.}$  - момент опору обертанню ротора в навколишньому середовищі (момент аеродинамічного опору);  $R$  - сила тяги тягових сопел;  $G_m$  - витрата газу, яка проходить через тягові сопла;  $K_{o.o.}$  - коефіцієнт аеродинамічного опору;  $\omega_P$  - кутова швидкість обертання ротора.

Коефіцієнт корисної дії розширювальної машини:

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_S} = \frac{M_T \omega_P}{G_n h_S}, \quad (2)$$

де  $N_S$  - ізоентропна (наявна) потужність розширювальної машини;

$G_n$  - витрата газу через підвідне сопло:

$$G_n = \mu_n \cdot P_n^* \cdot f_{кр.n} \cdot \sqrt{\frac{k}{zRT_n^*} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

де  $P_n^*$  - повний тиск на вході в підвідне сопло;  $\mu_n$  - коефіцієнт витрати підвідного сопла;  $k$  - показник адіабати газу;  $T_n^*$  - повна температура на вході в підвідне сопло;  $f_{кр.n}$  - площа критичного перерізу підвідного сопла;  $R$  - питома газова стала;  $z$  - коефіцієнт стиснення газу;

$h_S$  - питома ізоентропна робота розширення:

$$h_s = \frac{k}{k-1} zRT_n^* \left[ 1 - \left( \frac{P_{навк.сер.}}{P_n^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

При обертанні вала турбіни на тягові консолях діє сила лобового опору з боку робочого тіла при витіканні з тягових сопел. При виникненні надзвукових швидкостей на профілях робочого колеса турбіни відбувається гальмування потоку через стрибки ущільнення, тобто настає хвильова криза. Критичне число Маха, яке відповідає початку хвильової кризи, визначається формулою, яка наведена в роботі Бадягіна О.О.

$$M_{крит} = \frac{1}{\cos \chi_c} \left[ 1 + \frac{(k+1)^{4/3}}{2} \cdot \frac{\bar{c}^{4/3}}{\cos^{2/3} \chi_c} - \frac{(k+1)^{2/3} \cdot \bar{c}^{2/3}}{\cos^{1/3} \chi_c} \right], \quad (3)$$

де:  $\chi_c$  - кут стріловидності профілю,  $\bar{c}$  - відносна товщина профілю.  
Дійсне число Маха на периферії робочого колеса СРРМ

$$M_D = \frac{U_R}{a} = \frac{\pi \cdot D_n \cdot n_T}{60 \cdot \sqrt{k \cdot z \cdot R \cdot T_{вих}}}, \quad (4)$$

де:  $U_R$ ,  $a$  - окружна швидкість і швидкість звуку на зрізі тягового сопла відповідно;  $D_n$  - діаметр периферії;  $n_T$  - частота обертання ротора;  $T_{вих}$  - температура в корпусі пневмоагрегату.

Якщо  $M_{крит} < M_D$ , то робота розширювальної машини на даних режимах знаходиться в зоні хвильової кризи, тому основну частку аеродинамічних втрат становлять хвильові втрати.

В дисертаційній роботі розроблені методика виявлення хвильової кризи та рекомендації по розширенню зони ефективної роботи агрегату. Методика використовувалася для аналізу роботи промислового зразка пневмоагрегату та підтверджена результатами експериментальних досліджень. Розроблені рекомендації мають практичне значення і будуть враховані при проектуванні нових зразків.

**Третій розділ** присвячений проведенню фізичних експериментів на модельному стенді та на стенді натурних випробувань, а також обробці та аналізу отриманих результатів.

Спочатку випробування проводилися на модельному стенді підприємства ТОВ "Укрнафтозапчастина", м. Суми, оскільки на цьому підприємстві є балони (ресивери) з стисненим повітрям великих обсягів, а також поршнева компресорна установка, яка використовувалася для наповнення цих балонів. Принципова схема модельного стенду показана на рисунку 3. Випробування проводились для двох значень критичних площин тягових сопел СРРМ: первинних -  $d_{кр.т.}=13,7$ мм та збільшених -  $d_{кр.т.}=15,6$ мм.

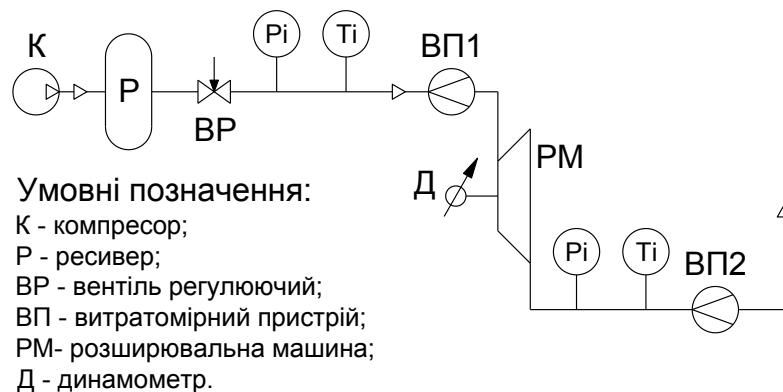
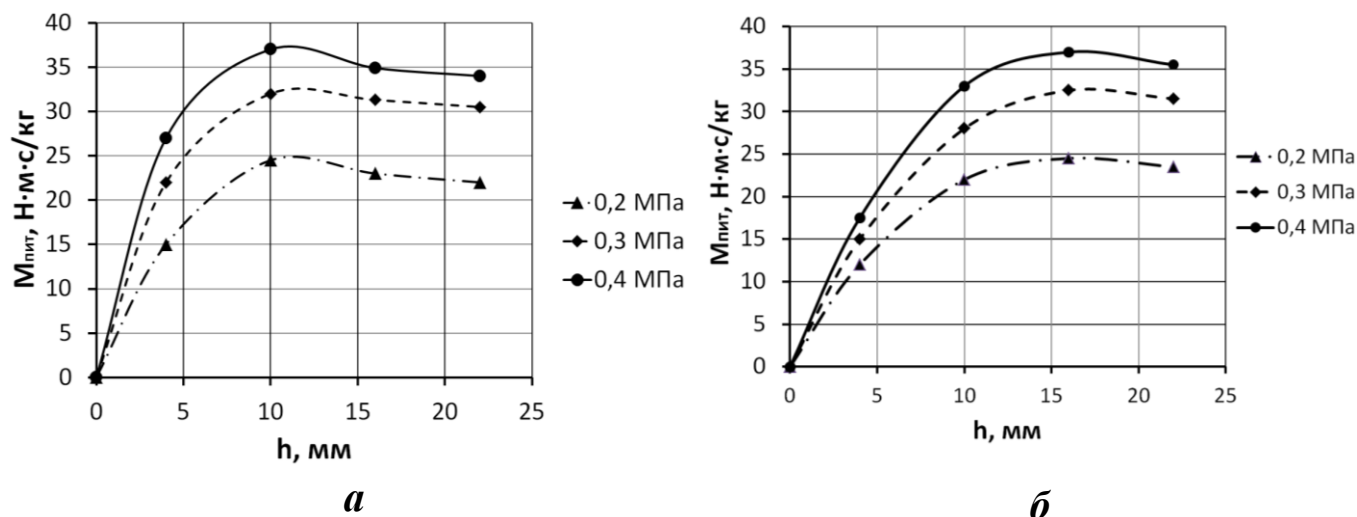


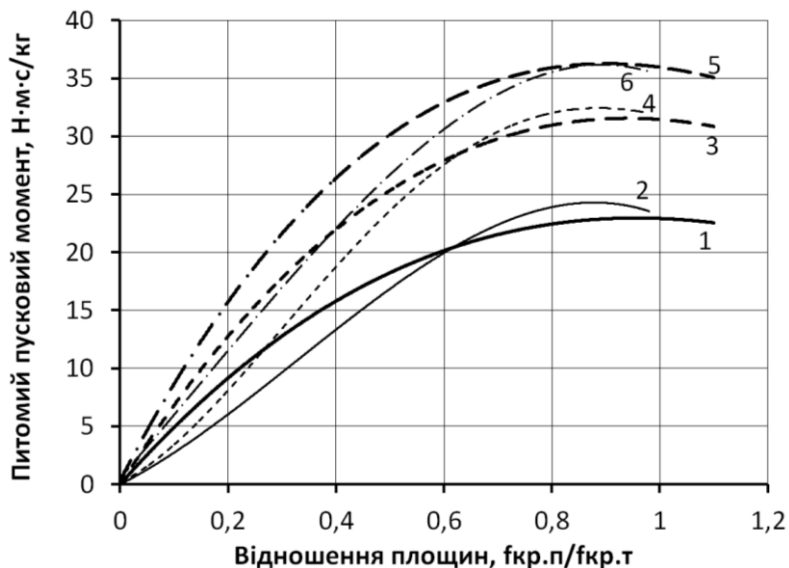
Рисунок 3 – Принципова схема модельного стенду

В ході проведення експериментальних досліджень отримані графічні залежності питомого пускового моменту при різних положеннях  $h$  голки підвідного сопла та тиску на вході СРРМ (рисунок 4). Варто зазначити, що величина  $h$  - це відстань, яка характеризує положення голки підвідного сопла від упору в корпус ( $h = 0$  мм) до повного відкриття прохідного перерізу підвідного сопла ( $h \geq 20$  мм). Питомий пусковий момент розраховувався як відношення пускового моменту на валу до витрати газу.

Рисунок 4 – Залежності питомого пускового моменту при різних положеннях  $h$  голки підвідного сопла для первинних (а) та збільшених (б) тягових сопел

Аналіз рисунка 4 показав, що діапазон зміни ходу голки  $h$  підвідного сопла, при якому ефективність РМ (питомий пусковий момент) максимальна, ширше у розширювальній машині зі збільшеними тяговими соплами. Це свідчить про те, що зона ефективної роботи розширювальної машини зі збільшеними тяговими соплами ширша і близька до режиму роботи при повністю відкритому підвідному соплі, тобто до розрахункового режиму.

Також у ході проведення випробувань досліджено вплив відношення площин критичних перерізів підвідного та тягових сопел, на ефективність (питомий пусковий момент) розширювальної машини (рисунок 5). Варто відзначити, що площа тягових сопел залишалася постійною, а змінювалася площа перерізу підвідного сопла за рахунок переміщення голки.



- 1** –  $P_H=0,2$  МПа,  $d_{кр.т}=13,7$  мм;  
**2** –  $P_H=0,2$  МПа,  $d_{кр.т}=15,6$  мм;  
**3** –  $P_H=0,3$  МПа,  $d_{кр.т}=13,7$  мм;  
**4** –  $P_H=0,3$  МПа,  $d_{кр.т}=15,6$  мм;  
**5** –  $P_H=0,4$  МПа,  $d_{кр.т}=13,7$  мм;  
**6** –  $P_H=0,4$  МПа,  $d_{кр.т}=15,6$  мм.

Рисунок 5– Залежності питомого пускового моменту від відношення площин критичних перерізів підвідного та тягових сопел

Для зручності практичного застосування графічні залежності подані у вигляді формул, отриманих апроксимацією з похибкою менше 1%, де відношення площин позначено змінною  $x$ : **1** -  $M_{num} = 4,937x^3 - 34,53x^2 + 52,5x + 0,0088$ ; **2** -  $M_{num} = -40,95x^3 + 40,43x^2 + 23,73x - 0,0018$ ; **3** -  $M_{num} = 7,386x^3 - 49,61x^2 + 73,74x - 0,0586$ ; **4** -  $M_{num} = -54,96x^3 + 52,24x^2 + 34,17x - 0,124$ ; **5** -  $M_{num} = 12,46x^3 - 66,7x^2 + 89,83x + 0,34$ ; **6** -  $M_{num} = -33,08x^3 + 14,52x^2 + 53,29x + 0,555$ . Діапазони зміни величини  $x$  (відношення площин) представлені на рисунку 5.

Характер залежностей на рисунку 5 показує, що діапазон відношення площин критичних перерізів підвідного і тягових сопел, при якому ефективність СРРМ (питомий пусковий момент) максимальна, знаходиться у вузькому інтервалі значень ( $f_{кр.п} / f_{кр.т} = 0,85 \div 0,95$ ). Це справедливо як для первинних, так і для збільшених тягових сопел.

Випробування струминно-реактивного пневмоагрегату (рисунок 6) проводилися на дослідно-промисловому стенді натурних випробувань агрегатів типу ТДА-СРТ (турбодетандерних агрегатів зі струминно-реактивною турбіною), схема якого показана на рисунку 7.



Рисунок 6 – Фото дослідного зразка пневмоагрегату

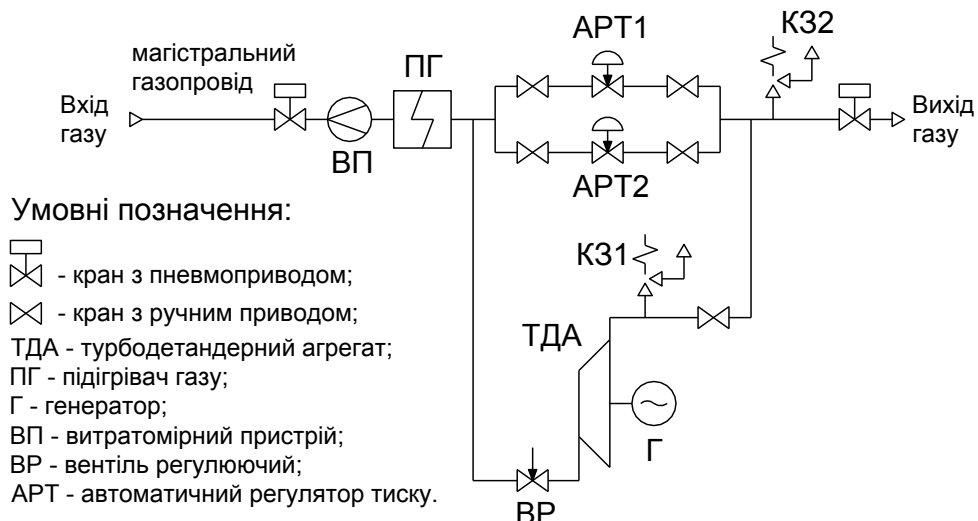


Рисунок 7 – Принципова схема стенду натурних випробувань

За результатами проведених досліджень струминно-реактивного турбодетандерного агрегату побудовані графіки залежності електричної потужності від частоти обертання вихідного вала ТДА при різних надлишкових тисках газу (рисунок 8). На графіку вказані наступні режими роботи агрегату:

1 –  $P_{\text{вх}}=3,3$  МПа,  $P_{\text{вих}}=0,2$  МПа,  $n_{\text{ГОЛКИ}}=8,5$  обертів - режим  $\sim 50\%$  (площина перерізу ПС закрыта приблизно наполовину голкою);

2 –  $P_{\text{вх}}=3,9$  МПа,  $P_{\text{вих}}=0,2$  МПа,  $n_{\text{ГОЛКИ}}=8,5$  обертів - режим  $\sim 50\%$ ;

3 –  $P_{\text{вх}}=3,2$  МПа,  $P_{\text{вих}}=0,2$  МПа,  $n_{\text{ГОЛКИ}}=20$  обертів - режим 100% (площина перерізу ПС повністю відкрита);

4 –  $P_{\text{вх}}=3,9$  МПа,  $P_{\text{вих}}=0,2$  МПа,  $n_{\text{ГОЛКИ}}=20$  обертів - режим 100%;

5 –  $P_{\text{вх}}=4,9$  МПа,  $P_{\text{вих}}=0,22$  МПа,  $n_{\text{ГОЛКИ}}=20$  обертів - режим 100% ;

6 –  $P_{\text{вх}}=4,6$  МПа,  $P_{\text{вих}}=0,21$  МПа,  $n_{\text{ГОЛКИ}}=20$  обертів - режим 100%.

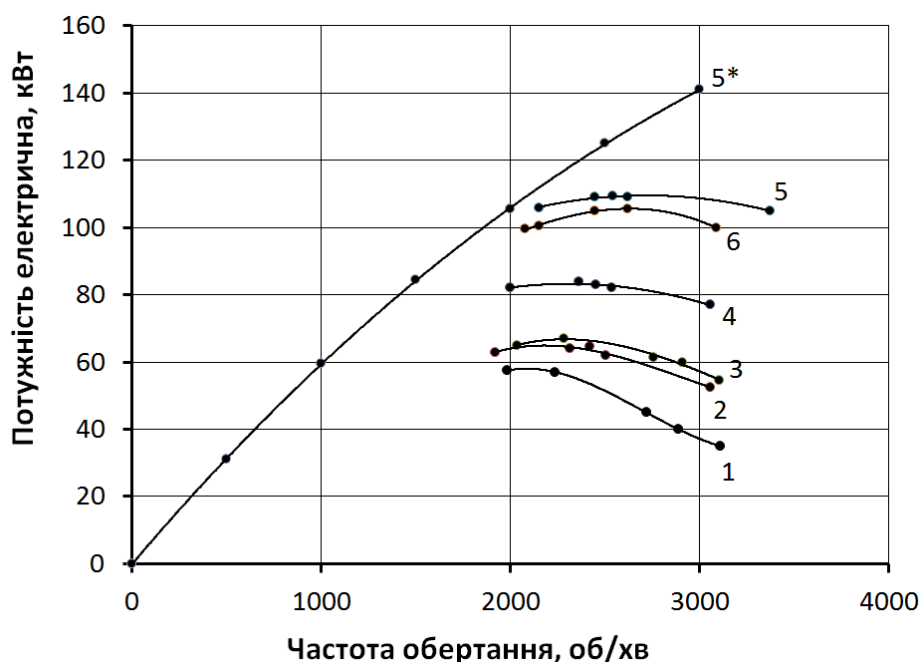


Рисунок 8 – Залежності електричної потужності від частоти обертання вихідного вала пневмоагрегату

Характеристика 5\* - це розрахункова (теоретична) залежність, побудована за параметрами дослідної характеристики 5. Аналіз форми отриманих залежностей 1-6 вказує на їх "падіння", яке починається в районі 2000 об/хв вала генератора. При цьому розрахункова характеристика 5\* безперервно зростає по потужності при збільшенні частоти обертання. Дане явище пов'язане з різким зростанням аеродинамічного опору трубок робочого колеса в результаті виникнення хвильової кризи при їх обтіканні. Хвильова криза характеризується великими числами Маха та стрибками ущільнення на профілях робочого колеса, що створює додатковий зовнішній аеродинамічний опір.

Для кожної характеристики було виконано по 5 вимірювань контрольованих параметрів на одному їх рівні з метою отримання відносної похибки результатів 5 – 10% при довірчій імовірності 0,9 – 0,95.

Експериментальні дані оброблені методом найменших квадратів, отримані рівняння регресії описують експериментальні точки із середньоквадратичною похибкою, що не перевищує 1 %. Адекватність рівнянь регресії підтверджено критеріями Фішера.

В дисертаційній роботі за допомогою розробленої методики встановлено, що для даного конструктивного виконання (з кутом стріловидності  $0^\circ$ ) хвильова криза починається з близько 2000 об/хв по валу генератора (таблиця 1). Якщо змінити кут стріловидності на  $50^\circ$ , то хвильова криза починається з близько 2800 об/хв по валу генератора. Це означає, що розроблена методика дає змогу розширити зону ефективної та стійкої (без хвильової кризи) роботи пневмоагрегату.

Таблиця 1 – Вихідні дані та результати розрахунку зони хвильової кризи з кутом стріловидності  $0^\circ$  ( $50^\circ$ )

<i>Найменування величин</i>	<i>Значення</i>
<i>Вихідні данні</i>	
Газова стала потоку (R), Дж/(кг·К)	508
Показник адіабати потоку (k)	1,323
Відносна товщина профілю (соплової трубки) ( $\bar{c}$ )	0,318
Кут стріловидності профілю ( $\chi_c$ ), град.	0 (50)
Радіус РК СРРМ, м	0,124
Швидкість звуку (a), м/с	381
Частота обертання вихідного валу ТДА, об/хв	2000 (2800)
<i>Результати розрахунку</i>	
Частота обертання СРРМ, об/хв	15700 (22000)
Окружна швидкість на периферії РК ( $U_R$ ), м/с	203 (305)
Число Маха на периферії РК ( $M_D$ )	0,532 (0,74)
Критичне число Маха ( $M_{крит}$ )	0,517 (0,79)
Виконання умови хвильової кризи - $M_D > M_{крит}$	Так (Ні)

За результатами проведених експериментів надані практичні рекомендації, які необхідно враховувати при проектуванні нових зразків турбодетандерних пневмоагрегатів.



В четвертому розділі розроблено методику та проведені чисельні дослідження за допомогою програмно-обчислювального комплексу *FlowVision*.

Розрахунки виконані для наступних режимів: пускового, роботи пневмоагрегату на модельному стенді та в умовах газорозподільчої станції.

В дисертаційній роботі детально викладені етапи виконання розрахунку від побудови твердотілої моделі до порівняльного аналізу з експериментальними даними, отриманими на модельному стенді. Необхідно зазначити, що результати розрахунку пускового режиму та при роботі пневмоагрегату на різних частотах обертання ротору підтверджені обробленими результатами експериментальних досліджень і відносна похибка не перевищує 7 %.

Наступним етапом відпрацювання методики розрахунку в програмному комплексі *FlowVision* були дослідження режимів роботи струминно-реактивного пневмоагрегату в умовах газорозподільчої станції. У якості вихідних даних задавалися параметри дослідної характеристики 5 (рисунок 8) з метою проведення подальшого порівняльного аналізу та викладення відповідних висновків.

Порівняльний аналіз отриманих результатів розрахунку з результатами випробувань по режиму 5 (рисунок 8) наведений на рисунку 9.

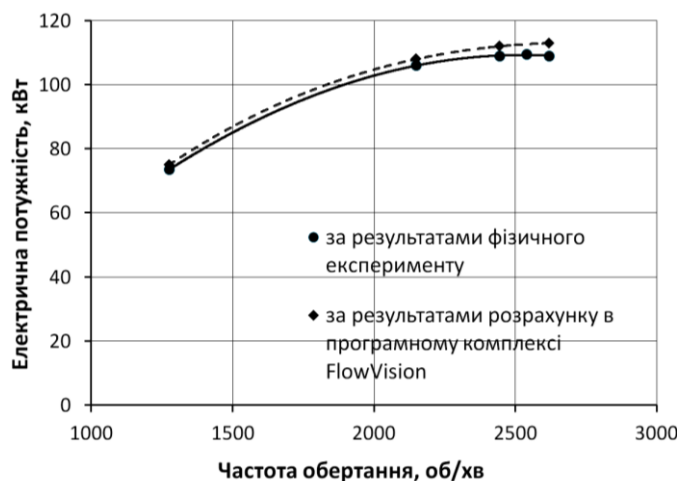


Рисунок 9 – Залежності електричної потужності від частоти обертання вихідного вала пневмоагрегату (порівняльний аналіз)

Аналіз результатів розрахунку по *FV* та випробувань на натурному стенді показав задовільний збіг (відносна похибка не перевищила 3 %).

Розроблена методика розрахунку характеристик струминно-реактивного пневмоагрегату дозволить надалі прогнозувати його результати при зміні геометричних параметрів твердотілої моделі.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача, яка полягає в підвищенні енергоефективності систем редукування тиску за рахунок використання струминно-реактивних пневмоагрегатів з удосконаленим робочим процесом, що дозволить отримати (утилізувати) потужність до 500 кВт. На підставі отриманих даних по теоретичним і експериментальним дослідженням зроблені наступні висновки:

1. Аналіз літературних джерел показав, що в системах редукування тиску застосовуються турбодетандерні агрегати на основі осьових і доцентрових розширювальних машин потужністю, як правило, більше 1 МВт. Агрегати меншої потужності на основі цих машин будуть складними і дорогими. Потужності більшості ГРС України становлять менше 1 МВт, тобто для них потрібні надійні та ефективні утилізуючі пневмоагрегати з швидким терміном окупності, зокрема на основі розширювальних машин струминно-реактивного типу.

2. Розвинена фізична модель робочого процесу пневмоагрегату в частині обтікання профілів колеса в середовищі в'язкого газу, а також уточнена математична модель робочого процесу струминно-реактивної розширювальної машини шляхом урахування коефіцієнта стиснення газу, що дозволило більш точно визначити параметри та характеристики. Обґрунтований характер течії газу на вході в ротор струминно-реактивної розширювальної машини, який полягає в забезпеченні мінімальної надзвукової швидкості, що дозволить підвищити ефективність машини.

3. Експериментально доведено, що діапазон зміни ходу голки  $h$  підвідного сопла, при якому ефективність струминно-реактивних розширювальних машин максимальна, знаходиться в інтервалі:

- для первинних тягових сопел ( $d = 13,7$  мм) -  $10\text{мм} \div 13\text{мм}$ ;
- для збільшених тягових сопел ( $d = 15,6$  мм) -  $13\text{мм} \div 19\text{мм}$ .

Зона ефективної роботи розширювальної машини зі збільшеними тяговими соплами ширша і близька до режиму роботи при повністю відкритому підвідному соплі, тобто до розрахункового режиму.

Встановлено, що основним геометричним співвідношенням, яке визначає ефективність роботи струминно-реактивної машини і пневмоагрегатів на її основі, є відношення площин критичних перерізів підвідного та тягових сопел і для зони максимальної ефективності це відношення знаходиться в діапазоні  $0,85 \div 0,95$ .

Для отримання результатів необхідної точності було виконано по 5 вимірювань на одному рівні факторів, що контролювалися, та одержані рівняння регресії експериментальних залежностей методом найменших квадратів.

4. Проведений аналіз режимів роботи дослідного зразка струминно-реактивного пневмоагрегату ТДА-СРТ-100/130-5,5/0,6ВРД за результатами випробувань на натурному стенді показав зони нестійкої роботи при окружних числах Маха вище 0,517, що пояснюється наявністю хвильової кризи на профілях робочого колеса. Розроблено методику для визначення наявності хвильової кризи при роботі агрегату, а також запропоновані науково обґрунтовані рекомендації, метою яких є виключити зону хвильової кризи в усьому значимому спектрі частот обертання ротора.

5. Результати розрахунку течії газу в проточній частині струминно-реактивного пневмоагрегату та його характеристик в програмному комплексі підтверджені експериментальними дослідженнями (відносна похибка не перевищує 7%). Відносна похибка результатів розрахунку характеристик пневмоагрегату в умовах роботи на газорозподільчій станції склала менше 3%.

6. У дисертаційній роботі відпрацьована методика розрахунку струминно-реактивного пневмоагрегату за допомогою програмно-обчислювального комплексу, що дозволяє скоротити час дослідження і підвищити економічний ефект, оскільки створення стенду натурних випробувань з необхідною обв'язкою і підводами значно дорожче та більше за часом. Застосування обчислювальних комплексів дозволить надалі прогнозувати результати при зміні геометричних параметрів твердотілої моделі пневмоагрегату і створювати більш ефективні струминно-реактивні пневмоагрегати.

7. Результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «Укрнафтозапчастина» при проектуванні номенклатурного ряду утилізуючих турбогенераторних агрегатів і парового турбогенератора для систем редукування тиску, а також в навчальний процес Сумського державного університету в дисциплінах «Пневмодинамічні машини й установки» (для напряму 6.050502 «Інженерна механіка»), «Пневмоагрегати та вакуумна техніка» (для напряму 6.050604 «Енергомашинобудування») і «Розширювальні турбомашини радіального типу» (для спеціальності 7(8).05060405 «Компресори пневмоагрегати і вакуумна техніка»), що підтверджено відповідними актами.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Гетало В.В. Исследование струйно-реактивного турбодетандера / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, С.К. Королев, А.С. Бережной // Компрессорное и энергетическое машиностроение: научно технический и производственный журнал. – 2011. – №4(26). – С. 33-41.

2. Гетало В.В. Исследование нереверсивной струйно-реактивной турбины для турбогенератора с помощью программного комплекса FlowVision / С.М. Ванеев, С.К. Королев, А.С. Бережной, В.В. Гетало, Н.Н. Фроленко, Е.Ю. Ховяков // Компрессорное и энергетическое машиностроение: научно технический и производственный журнал. – 2012. – №3(29). – С. 22-28.

3. Ванеев С.М. Исследование реверсивной струйно-реактивной турбины для турбогенератора с помощью программного комплекса FlowVision / С.М. Ванеев, С.К. Королев, А.С. Бережной, В.В. Гетало, Н.Н. Фроленко, Е.Ю. Ховяков // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – №4. – С. 14-20.

4. Гетало В.В. Исследование характеристики струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса FlowVision / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, С.К. Королев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2013. – №12(986). – С. 36-43. (входить до бази даних Ulrich's Periodicals Directory американського видавництва Bowker).

5. Гетало В.В. Струйно-реактивная турбина для решения проблемы энергосбережения в различных отраслях промышленности / С.М. Ванеев, В.В.

- Гетало, В.А. Глущенко // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – №7. – С.4-8. (Росія)
6. Гетало В.В. Создание турбодетандерного агрегата ТДА-СРТ-100 со струйно-реактивной турбиной для ГРС. ЧАСТЬ 1 / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, А.С. Бережной // Газотурбинные технологии. – 2014. – №1(120). – С. 40-46. (Росія)
7. Гетало В.В. Создание турбодетандерного агрегата ТДА-СРТ-100 со струйно-реактивной турбиной для ГРС. ЧАСТЬ 2 / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, А.С. Бережной // Газотурбинные технологии. – 2014. – №2(121). – С. 34-38. (Росія)
8. Гетало В.В. Исследование и анализ использования программного комплекса *FlowVision HPC* при расчете характеристик струйно-реактивной турбины / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, С.К. Королев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №11(1054). – С. 109-117. (входить до бази даних Ulrich's Periodicals Directory американського видавництва Bowker).
9. Гетало В.В. Исследование струйно-реактивной турбины для турбодетандерного агрегата / С. М. Ванеев, В.В. Гетало, С.К. Королев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – 2012. – №8. – С. 82-91. (за матеріалами доповіді на VIII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення»).
10. Гетало В.В. Исследование струйно-реактивной турбины для турбогенераторов в системах редуцирования газа / С.М. Ванеев, С.К. Королев, А.С. Бережной, В.В. Гетало, Н.Н. Фроленко, Е.Ю. Ховяков // Сталий розвиток і штучний холод. Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон, 2012. – С. 386-390.
11. Гетало В.В. Исследование течения газа в струйно-реактивной турбине с помощью программного комплекса *FlowVision* / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, Н.Н. Фроленко // Матеріали II Всеукраїнської міжвузівської НТК, тези доп., 17-20 квітня. – Суми : СумДУ, 2012. – Ч.3. – С. 91.
12. Гетало В.В. Потери на аэродинамическое сопротивление вращению рабочего колеса струйно-реактивной турбины в среде вязкого газа / С.М. Ванеев, В.В. Гетало // Матеріали II Всеукраїнської міжвузівської НТК, тези доп., 17-20 квітня. – Суми : СумДУ, 2012. – Ч.3. – С. 106-107.
13. Гетало В.В. Расчет характеристик струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса *FlowVision* и по одномерной теории течения газа / С.М. Ванеев, В.В. Гетало// матеріали НТК викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. – Суми : СумДУ, 2013. – Ч.2 – С. 25-26.
14. Ванеев С.М. Исследование экспериментальной струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса *FlowVision* / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, С.С. Мелейчук, Ю.Ю. Усик // Матеріали III Всеукраїнської міжвузівської НТК, тези доп., 22-25 квітня. – Суми : СумДУ, 2014. – Ч.2. – С. 203-204.

15. Гетало В.В. Опыт использования программного комплекса FlowVision при расчете характеристик струйно-реактивной турбины / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, С.С. Мелейчук, Ю.Ю. Усик, А.Н. Орлов // Матеріали III Всеукраїнської міжвузівської НТК, тези доп., 22-25 квітня. – Суми : СумДУ, 2014. – Ч.2. – С. 187-188.

16. Гетало В.В. Усовершенствование систем редуцирования газа путем внедрения пневмоагрегатов на базе струйно-реактивной турбины / С.М. Ванеев, В.В. Гетало // Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» 21-24 травня. – Кіровоград, 2014. – С. 156-157.

### АНОТАЦІЯ

Гетало В. В. «Вдосконалення систем редукування тиску шляхом використання струминно-реактивних пневмоагрегатів». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Сумський державний університет, Суми, 2014 р.

У дисертаційній роботі запропоновано і науково обґрунтовано застосування струминно-реактивних пневмоагрегатів для отримання електроенергії в якості утилізуючих установок у системах редукування тиску, що сприяє вирішенню проблеми енергозбереження. Розвинена теорія і математична модель робочого процесу розширювальної машини (в якості виконавчого пристрою пневмоагрегату) шляхом урахування коефіцієнта стиснення газу, що дозволило більш точно визначити її параметри та характеристики. Встановлено, що основним геометричним співвідношенням, яке визначає ефективність роботи розширювальної машини є відношення площин критичних перерізів підвідного і тягових сопел. На основі проведених фізичних та чисельних експериментів визначено зони стійкої роботи пневмоагрегату без хвильової кризи, тобто з максимальною ефективністю. Адекватність розробленої методики визначення зони хвильової кризи підтверджена розрахунками та фізичними експериментами. Відпрацьована методика проведення чисельних досліджень течії газу в пневмоагрегаті за допомогою програмного комплексу має практичне значення, оскільки дозволяє скоротити час на проведення досліджень і підвищити їх ефективність.

Ключові слова: енергозбереження, струминно-реактивний пневмоагрегат, розширювальна машина, підвідне сопло, математична модель, хвильова криза, чисельні експерименти.

### АННОТАЦИЯ

Гетало В. В. «Совершенствования систем редуцирования давления путем применения струйно-реактивных пневмоагрегатов». - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Сумской государственной университет, Сумы, 2014 г.

В диссертационной работе предложено и научно обосновано применение струйно-реактивных пневмоагрегатов для получения электроэнергии в качестве утилизирующих установок в системах редуцирования давления, что способствует решению проблемы энергосбережения. Развита теория и математическая модель рабочего процесса расширительной машины струйно-реактивного типа (в качестве исполнительного устройства пневмоагрегата) путем учета коэффициента сжимаемости газа, что позволило более точно определить ее параметры и характеристики. Установлено, что основным геометрическим соотношением, определяющим эффективность работы расширительной машины является отношение площадей критических сечений питающего и тяговых сопел. На основе проведенных физических и численных экспериментов определены зоны устойчивой работы пневмоагрегата без волнового кризиса, т.е. с максимальной эффективностью. Адекватность разработанной методики определения зоны волнового кризиса подтверждена расчетами и физическими экспериментами. Отработанная методика проведения численных исследований течения газа в пневмоагрегате с помощью программного комплекса имеет практическое значение, так как позволяет сократить время на проведения исследований и повысить их эффективность.

Ключевые слова: энергосбережение, струйно-реактивный пневмоагрегат, расширительная машина, питающее сопло, математическая модель, волновой кризис, численные эксперименты.

## **ABSTRACT**

Getalo V. V. «Perfection of systems pressure reduction by applying the jet-reactive pneumatic packages». - Manuscript.

Doctoral Technical Science candidate's thesis for a speciality 05.05.17 - hydraulic machines and hydropneumatic units. – Sumy state university, Sumy, 2014.

Utilization of jet-reactive pneumatic packages as recovery units for reduction systems is suggested and scientifically grounded in this thesis work. Utilization of jet-reactive pneumatic packages facilitates electric power generation and a solution to energy saving problems. A theory and a simulation model of operation of a jet-reactive type expansion machine (as a pneumatic package actuating device) has been developed by considering gas compressibility factor that made it possible to calculate its parameters and characteristics more precisely. It is found that a main geometrical ratio which defines expansion machine operational efficiency is the ratio of feed nozzle critical bore section to thrust nozzle critical bore section. Based on the conducted physical and simulation studies a stability region of the pneumatic package has been fixed without shock stall that is with the maximum efficiency. The tried and true simulation study procedure of gas flow inside the pneumatic package by means of the software has a practical use as it allows to shorten time for studies and increase efficiency.

Keywords: energy saving, jet-reactive pneumatic package, expansion machine, feed nozzle, simulation model, shock stall, simulation studies.