

У спеціалізовану вчену раду К 55.051.03  
Сумського державного університету

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Бережного Олександра Сергійовича**  
**«УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК**  
**СТРУМИННО-РЕАКТИВНОГО ПНЕВМОАГРЕГАТА НА ОСНОВІ**  
**УТОЧНЕННЯ МОДЕЛІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ»**,  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

### 1. Актуальність теми дисертації

Важливою задачею сучасної газотранспортної галузі є задача створення пневматичного (газового), ефективного, надійного та зручного в експлуатації привода для безпечного функціонування магістральних газопроводів.

Згідно з останніми вимогами приводи шарових кранів, які встановлюються на компресорних станціях та на лінійній частині магістральних газопроводів, повинні використовувати в якості робочого тіла непідготовлений (безпосередньо з труби) природний газ та забезпечувати керування краном у всіх діапазонах тиску газу на вході в привод. При цьому температура газу на вході в привод може змінюватися в межах від  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такі складні вимоги практично повністю виключили можливість використання для кранів з умовним діаметром  $DN > 300$  мм чисто пневматичних (газових) приводів об'ємного принципу дії, тому в даний час для цих цілей використовують пневмогідропровід. Однак він має ряд суттєвих недоліків, таких як: наявність другого робочого тіла (масла), що значно ускладнює конструкцію, процес експлуатації та знижує надійність привода; наявність рухомих ущільнень, підвищені ударні навантаження на деталі поворотного механізму та низька вогнестійкість привода в цілому.

Для вирішення задачі створення простих, надійних і зручних в експлуатації пневмоприводів шарових кранів можна використовувати агрегати на базі струминно-реактивної розширювальної машини (СРРМ). Для даної сфери застосування ці машини мають ряд беззаперечних переваг перед класичними (осьовими та доцентровими). Серед них можна виділити основні: простота конструкції і, як наслідок, висока надійність, високий рівень уніфікації, стабільність вихідних характеристик, мала маса та момент інерції, що викликає підвищення динамічності привода в цілому і беззаперечно простота конструкції в реверсивному виконанні.

Під час розробки струминно-реактивного пневмодвигуна як основного виконавчого елемента пневмоприводів шарових кранів великих прохідних перерізів автор зіткнувся з цілою низкою невирішених питань: недостатня вивченість робочого процесу, існуюча методика розрахунку характеристик СРРМ

потребувала удосконалення, відсутність експериментальних даних з впливу деяких геометричних співвідношень на параметри СРРМ та методики загального проектування пневмоагрегатів на базі принципово нової розширювальної машини.

Тому дисертаційна робота, яка присвячена розвитку теорії робочого процесу струминно-реактивних пневмодвигунів, являється важливою і актуальною.

Актуальність теми дисертації підтверджується ще й тим, що вона виконувалася в рамках науково-дослідницької тематики кафедр технічної теплофізики та прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету з держбюджетної теми «Дослідження робочих процесів енергетичних машин» (N ДР 0110U004210).

## **2. Структура та об'єм дисертації**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку бібліографічних джерел та додатків. Текст дисертації викладений на 157 сторінках, у тому числі 50 рисунків і одна таблиця. У додатках наведені акти, які підтверджують впровадження основних результатів дисертаційної роботи на підприємстві та в учбовому процесі кафедр ТТФ і ПГМ Сумського державного університету.

Текст дисертації спочатку має перелік умовних позначень, індексів та скорочень. Він значно покращує процес ознайомлення з роботою.

### Вступ

Вступ містить аргументацію актуальності питань створення ефективних струминно-реактивних пневмоагрегатів та дослідження робочого процесу струминно-реактивної розширювальної машини. Сформульовані мета і завдання, об'єкт і предмет дослідження, а також методи досліджень. Вказана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Відмічений особистий вклад здобувача, апробація результатів дисертаційної роботи та публікації основних результатів.

### Розділ 1

У першому розділі наведені результати інформаційного огляду існуючих літературних джерел за темою дисертаційного дослідження.

Розглянута проблема надійності пневмоагрегатів на прикладі пневмоприводів. Розроблений порівняльний аналіз і виявлені основні переваги, недоліки та області застосування пневмодвигунів різних типів, які можуть використовуватися в якості основного виконавчого елемента пневмоприводів. Більш детально розглянуті приводи шарових кранів великих прохідних перерізів магістральних газопроводів, що використовуються в даний час, враховані їх

недоліки, виходячи з яких для цієї області був запропонований пневматичний привод на базі принципово нової струминно-реактивної розширювальної машини.

У розділі відображені також інші можливі сфери застосування пневмоагрегатів на базі СРРМ. Найбільш потенціальною з них являється сфера утилізації ексергії стислих газів і парів, коли детандер-генераторні агрегати встановлюються на заміну або паралельно вузлам редукування на газорозподільчих станціях і пунктах, котельних і т.п. У даному випадку корисна енергія може бути отримана в детандер-генераторних агрегатах невеликої потужності (до 500 кВт) і використана в різних цілях як електрична.

Пневмоагрегати на базі СРРМ можуть також знайти своє призначення як аварійні генератори, турбокомпресорні агрегати систем підготовки імпульсного повітря для КС, у різних системах управління, медичній техніці тощо.

На основі аналізу літературних джерел був зроблений висновок, що даний тип розширювальної машини практично не використовувався в якості силового елемента, а існуючі методики розрахунку основних параметрів і характеристик потребують уточнення.

У першому розділі також формулюються мета дослідження та задачі, які вирішувались для її досягнення.

## Розділ 2

У другому розділі викладені основні положення моделі робочого процесу струминно-реактивної розширювальної машини, приведена методика розрахунку основних параметрів газового тракту СРРМ.

На основі закону збереження моменту кількості руху, закону збереження енергії та рівняння стану газу отримані основні рівняння робочих характеристик СРРМ (залежність моменту на валу, потужності та ККД від частоти обертання).

Аналіз даних рівнянь показав необхідність знаходження експериментальних коригуючих коефіцієнтів, зокрема коефіцієнта опору обертання ротора в середовищі в'язкого газу  $K_{o.o}$ . Отримана формула для визначення його величини і показаний вплив частоти обертання на його значення, яке може бути отримане за результатами вимірювань пускового моменту і частоти обертання на холостому ході СРРМ. Отриманий також вираз для розрахунку коефіцієнта профільного опору консолей ротора від числа Рейнольдса, який був визначений за окружною швидкістю.

У частині підвищення ефективності струминно-реактивних пневмоагрегатів показана необхідність правильного вибору співвідношення площ критичних перерізів тягового та підвідного сопел, що визначається коефіцієнтом відновлення повного тиску по довжині газового тракту. З цією метою була розроблена методика поелементного розрахунку даного коефіцієнта. Розглянуті наступні елементи проточної частини СРРМ: підвідне сопло, циліндрична частина втулки-дифузора, поворотне коліно, циліндрична частина консолі ротора і тягове сопло.

Далі в розділі наведено чисельне дослідження процесу течії газу в тракті СРРМ на пусковому режимі. Розрахунок проводився в програмному комплексі

FlowVision для 4-х варіантів конструктивних виконань СРРМ. Вивчена картина течії, відпрацьована методика чисельного дослідження та виконано порівняння з експериментом за значенням пускового моменту (похибка розрахунку склала менше 5%).

### Розділ 3

Третій розділ роботи присвячений опису експериментального стенду та вимірювальних приладів, методиці обробки результатів експерименту та аналізу похибок вимірювань.

Для досягнення поставленого в розділі завдання був створений експериментальний стенд для дослідження роботи струминно-реактивної розширювальної машини. На першому етапі було виконане продування підвідного сопла при різних положеннях центрального тіла (голки) і тисків на вході. За результатами цієї частини експерименту було визначене середнє значення коефіцієнту масової витрати підвідного сопла, яке склало 0,9. Значення  $\mu$  було занесене до програми розрахунку характеристик.

Далі за результатами вимірювань пускового моменту та холостого ходу машини був підрахований коефіцієнт опору обертанню, побудована його залежність від частоти обертання, проведена апроксимація із внесенням отриманого рівняння до програми розрахунку характеристик. В результаті були побудовані робочі характеристики струминно-реактивної машини (момент на валу, потужність і ККД в залежності від частоти обертання).

Був показаний вплив на робочі характеристики зазору між робочим колесом та корпусом пневмоагрегата і дані рекомендації з вибору значень цього параметру ( $\Delta > 10$  мм).

За результатами експериментального дослідження була також побудована безрозмірна, універсальна залежність коефіцієнту профільного (лобового) опору консолей ротора від числа Рейнольдса, який визначається по окружній швидкості.

У розділі були виконані відповідні висновки і рекомендації.

### Розділ 4

На основі теоретичних досліджень, наведених у розділі 2, і експериментальних залежностей розділу 3 були створені методика й алгоритм проектування пневмоагрегатів на базі струминно-реактивної розширювальної машини.

В якості наочності і згідно з поставленими задачами був виконаний кінематичний розрахунок пневмопривода шарового крану DN 500 PN 80 з двома різними механізмами редукції: гвинто-кулісними та прецесійними.

Виконано порівняння отриманих пневмоприводів за масогабаритними показниками та показниками економічності з серійними пневмогідроприводами шарового крану DN 500 PN 80. Особливо виділяється струминно-реактивний привод з прецесійним редуктором, економічність якого збільшилась до 2-х разів

за витратою газу і в 2 рази за масогабаритними показниками в порівнянні з пневмогідроприводом.

У висновках сформульовані всі основні наукові положення і практичні результати, що отримані в дисертаційній роботі.

### **3. Наукова новизна**

Наукові положення, висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертації, є цілком обґрунтованими, в їх основі лежать фундаментальні закони гідрогазодинаміки.

Наукова новизна отриманих результатів складається з наступного:

- теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена доцільність застосування струминно-реактивних пневмоагрегатів різного призначення, в тому числі в якості пневмоприводів шарових кранів;

- вперше виконаний поелементний аналіз втрат у проточній частині струминно-реактивної розширювальної машини, що дало змогу уточнити фізичну картину протікаючих в ній процесів, визначити елементи, які найбільш впливають на її ефективність та створити адекватну математичну модель течії;

- вперше досліджений вплив на ефективність струминно-реактивного пневмодвигуна зазору між робочим колесом та корпусом; отримані експериментальні коефіцієнти і залежності, які враховують втрати на аеродинамічний опір під час обертання робочого колеса в середовищі в'язкого газу, що дозволило уточнити методику розрахунку геометричних параметрів та робочих характеристик розширювальної машини;

- вперше за допомогою програмного комплексу FlowVision виконано моделювання та дослідження течії газу в проточній частині струминно-реактивного пневмодвигуна на пусковому режимі. Проведене порівняння отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень, що дозволило оцінити можливість використання цього комплексу для дослідження та проектування струминно-реактивних пневмоагрегатів.

### **4. Практична цінність**

До суттєвого практичного результату досліджуваної роботи треба віднести розробку методики поелементного розрахунку втрат та уточнення існуючої методики розрахунку параметрів і характеристик СРРМ за допомогою введення в розрахунок коефіцієнта відновлення повного тиску та коригуючих розмірних і безрозмірних залежностей; розробку алгоритму та методики проектування струминно-реактивних пневмоприводів шарових кранів магістральних газопроводів, впровадження результатів дисертаційної роботи в ПП «Променергомаш», «Варіант-Гермотехніка» і в навчальному процесі СумДУ.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планами науково-дослідницьких робіт кафедр технічної теплофізики і прикладної гідроаеродинаміки Сумського державного університету та державною науково-технічною програмою «Новітні і ресурсозберігаючі технології в енергетиці,

промисловості та агропромислового комплексу». Здобувач був виконавцем держбюджетної науково-дослідницької роботи: «Дослідження робочих процесів енергетичних машин» (№0110U004210).

Виходячи з цього, вважаю дисертаційну роботу Бережного О.С., яка присвячена дослідженню робочого процесу й удосконаленню характеристик пневмоагрегатів на базі струминно-реактивної розширювальної машини, актуальною і практично важливою.

## 5. Зауваження

За змістом дисертаційної роботи слід зробити наступні зауваження:

1) Аналізуючи стан питання, не достатню увагу приділено іноземному досвіду створення пневмоагрегатів на базі струминно-реактивної розширювальної машини.

2) Відсутнє моделювання течії газу в проточній частині СРРМ із застосуванням програмного комплексу FlowVision при робочій частоті обертання СРРМ.

3) Не приводяться формули для структурних складових втрат, за допомогою яких були розраховані графічні залежності, наведені на рисунку 2.2 (розділ 2, стор. 51).

4) Не чітко сформульовано, в чому саме полягає удосконалення робочих характеристик, про що згадував автор.

5) В експериментальній частині бажано було б провести експеримент впливу зазору між ротором СРРМ і корпусом, а також значення коефіцієнта опору обертанню на характеристики привода для природного газу.

6) Текст дисертації має ряд граматичних помилок, неточностей в рисунках, позначеннях і визначеннях.

## 6. Висновок

Виконаний аналіз змісту дисертації Бережного О.С. «Удосконалення робочих характеристик струминно-реактивного пневмоагрегата на основі уточнення моделі робочого процесу» дозволяє зробити наступні висновки:

1. Тема дисертаційної роботи являється актуальною і відповідає спеціальності 05.05.17 - «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати».

2. Результати, що представлені автором в дисертаційній роботі, мають наукову новизну і практичну цінність.

3. Отримані результати являються достовірними. Здобувач обґрунтував проведені дослідження і підтвердив їх експериментальними результатами з використанням фундаментальних законів механіки рідини та газу.

4. Основні результати дисертаційної роботи викладені в 12 статтях (3 з яких – в іноземних виданнях, з них одна входить у наукометричну базу даних Scopus) у спеціалізованих виданнях, які входять в перелік, підтверджений МОН України. Результати дисертації доповідались на 6-ти міжнародних та 2-х всеукраїнських науково-технічних конференціях.



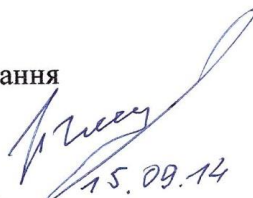
5. Викладення матеріалу в тексті дисертації послідовне і сприйнятливим для розуміння. Робота виконана згідно з правилами оформлення текстової та графічної документації.

6. Автореферат повністю висвітлює зміст дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота «Удосконалення робочих характеристик струминно-реактивного пневмоагрегата на основі уточнення моделі робочого процесу» являється завершеною роботою, яка повністю відповідає вимогам п. 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» МОН України, які пред'являються до кандидатських дисертацій, а її автор Бережний Олександр Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент:

завідуючий відділом нестационарної газодинаміки  
та аеропружності Інституту проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України,  
доктор технічних наук, професор

  
15.09.14

Гнесін В.І.

Підпис д.т.н. професора Гнесіна В.І.  
підтверджую:  
вчений секретар ІПМаш НАН України,  
кандидат технічних наук



Курська Н.М.