

У спеціалізовану вчену раду К 55.051.03  
Сумського державного університету

## **ВІДЗИВ**

офіційного опонента Дранковського Віктора Едуардовича  
на дисертаційну роботу Бережного Олександра Сергійовича на тему:  
**«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**

Надійність сучасної газотранспортної галузі напряму залежить від надійності всіх складових її елементів, в тому числі і надійності приводів запірної та регулюючої арматури. В даний час в якості запірної арматури магістральних газопроводів використовуються переважно шарові крани. 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 природний газ безпосередньо з труби. Температура такого газу може змінюватися в межах від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . Такі складні вимоги практично повністю унеможливили використання виключно пневматичних приводів об'ємного принципу дії для кранів великих прохідних перерізів ( $\text{DN}>300\text{мм}$ ). Саме тому в даний час для цих цілей використовують пневмогідропривод.

Аналіз конструктивних виконань та досвіду експлуатації пневмогідроприводу виявив ряд суттєвих недоліків: наявність масла в системі, що значно ускладнює конструкцію та експлуатацію, відсутність його може призвести до аварійних ситуацій; наявність рухомих ущільнень, які в умовах низьких температур можуть виходити з ладу; підвищені ударні навантаження на деталі поворотного механізму тощо.

В якості альтернативи пневмогідроприводів шарових кранів великих прохідних перерізів можуть бути використані пневмоагрегати на базі струминно-реактивної розширювальної машини (СРРМ). Для даної сфери застосування ці машини мають ряд беззаперечних переваг перед пневмогідроприводами та класичними турбінними приводами. Основними з них є: простота конструкції, висока надійність, стабільність вихідних характеристик, мала маса та момент інерції, що викликає підвищення динамічності привода в цілому.

Автором була поставлена науково-практична задача створення надійного, ефективного та простого пневмопривода на базі струминно-реактивної розширювальної машини. Під час її вирішення автору довелося вирішувати

наступні задачі: 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.

Дисертаційна робота стала віддзеркаленням рішення цих питань, вона присвячена розвитку теорії робочого процесу струминно-реактивних пневмодвигунів, являється важливою і актуальною.

Актуальність теми дисертації підтверджується використанням її матеріалів у науково-дослідних звітах кафедр технічної теплофізики та прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій.** Свої наукові положення здобувач обґрунтовує тим, що в їх основу закладені використання класичних рівнянь гідро- та аеромеханіки, застосовувалися методи чисельного і фізичного дослідження робочого процесу енергетичних машин.

Їх дотримання забезпечує точність результатів прийняту в інженерній практиці на сучасному рівні знань про робочий процес СРРМ. Крім того, наукові положення спираються на базові положення теорії енергетичних машин, а також на результати чисельного експерименту з розрахунку течії газу в проточній частині машини та підтвердженні застосуванням апробованих методів фізичного дослідження. Отримані в роботі наукові результати й положення ґрунтуються також на методах математичної статистики і теорії ймовірності.

Свої висновки та рекомендації автор робить на основі чіткого та логічного аналізу з урахуванням закономірностей робочого процесу СРРМ. Тому вони теж є обґрунтованими, мають чітко виражений практичний характер та підтверджуються впровадженням результатів дисертаційної роботи щодо розробки струминно-реактивних пневмодвигунів.

**Достовірність** отриманих результатів базується на використанні фундаментальних законів гідроаеромеханіки, визнаних залежностей теорії ракетних двигунів, експериментально перевірених закономірностей робочого процесу СРРМ.

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

## **2. Наукова новизна**

Наукова новизна отриманих результатів складається з наступного:

- обґрунтована теоретично та підтверджена експериментально доцільність застосування струминно-реактивної розширювальної машини в якості пневмоприводів;
- вперше виконаний поелементний аналіз втрат у проточній частині струминно-реактивної розширювальної машини дав змогу уточнити фізичну картину протікаючих в ній процесів, створити адекватну математичну модель течії та визначити елементи, які впливають на її ефективність;
- вперше досліджені дані впливу зазору між робочим колесом та корпусом на ефективність струминно-реактивної розширювальної машини, отримані експериментальні коефіцієнти та залежності, які враховують втрати на аеродинамічний опір під час обертання робочого колеса в середовищі в'язкого газу, що дозволило уточнити методику розрахунку її геометричних параметрів та робочих характеристик;
- виконано дослідження течії газу в проточній частині струминно-реактивної розширювальної машини за допомогою програмного комплексу FlowVision, порівняння отриманих результатів із результатами експериментальних досліджень дозволило оцінити можливість використання цього комплексу для дослідження струминно-реактивної розширювальної машини.

## **3. Практична цінність**

До суттєвого практичного результату досліджуваної роботи треба віднести:

- методику поелементного розрахунку втрат енергії в проточній частині струминно-реактивної розширювальної машини, що дозволяє створити агрегат із високими показниками ефективності;
- вперше експериментально отримана залежність коефіцієнта профільного опору робочого колеса СРРМ від числа Рейнольдса та запропоновані практичні рекомендації щодо вибору зазору між робочим колесом та корпусом машини;
- алгоритм та методику проектування струминно-реактивних пневмоприводів для всього ряду шарових кранів (DN 300 - 1400) магістральних газопроводів, що дозволило прискорити процес їх розрахунку та проектування;
- розрахунки пускових моментів струминно-реактивної розширювальної машини в програмному комплексі FlowVision та їх порівняння з експериментальними даними для різних геометричних розмірів тягового та підвідного сопел, а також тисків на вході СРРМ, результати якого з похибкою не

більше 5% співпадають з результатами експерименту;

- результати теоретичних та експериментальних досліджень, якими сформовано новий підхід до дослідження СРРМ, і які прийняті для використання в практиці створення СРПП на підприємствах ТОВ "Варіант-Гермотехніка" та ПП "Променергомаш", а також впроваджені в навчальний процес вищого навчального закладу СумДУ, при викладанні спецкурсів "Пневмодинамічні машини та установки", "Розширювальні турбомашини радіального типу" для спеціальностей "Гідравлічні машини, гідроприводи та гідропневмоавтоматика" та "Компресори, пневмоагрегати та вакуумна техніка".

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

**Повнота викладу в опублікованих працях.** Апробація результатів дослідження здійснена досить широко і повно в тезах 6 доповідей у цілому ряді науково-технічних конференцій. Матеріали дисертації опубліковані у 12 наукових роботах (3 статті в зарубіжних виданнях та 1 публікація у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus), 8 із яких у фахових наукових виданнях України.

Результати роботи достатньо повно висвітлені в опублікованих наукових роботах. Аналіз змісту та висновків у наведених статтях відповідає змісту дисертації і повністю відбиває її наукове значення та практичну цінність.

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

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 підприємствах та в навчальному процесі кафедр ТТФ і ПГМ Сумського державного університету.

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

У вступі відображена актуальність питань створення та дослідження струминно-реактивних пневмоагрегатів. Далі сформульована мета, 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.

Перший розділ дисертаційної роботи Бережного О.С. носить інформаційно-літературний характер. Тут наведені результати огляду основних вітчизняних та закордонних літературних джерел за темою дослідження.

Представлений порівняльний аналіз із зазначенням основних переваг і недоліків пневмодвигунів різних типів, які можуть використовуватися в якості основного виконавчого елемента пневмоприводів. Запропонований пневматичний привод на базі принципово нової струминно-реактивної розширювальної машини.

У розділі також присутній аналіз застосування пневмоагрегатів на базі СРРМ в інших сферах народного господарства. Пневмоагрегати на базі СРРМ можуть 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.

Другий розділ дисертаційної роботи носить теоретичний характер. В ньому викладені основні положення математичної моделі робочого процесу СРРМ, яка базується на основних рівняннях гідрогазодинаміки. На їх основі отримане основне рівняння моменту на валу струминно-реактивної машини від частоти обертання.

З аналізу отриманого рівняння була показана необхідність знаходження експериментальних додаткових коефіцієнтів, зокрема коефіцієнта опору обертання ротора в середовищі в'язкого газу  $K_{o,o}$ . Його значення може бути отримане експериментальним шляхом за результатами вимірювання пускового моменту на валу та частоти обертання на холостому ході. Отриманий також вираз для розрахунку коефіцієнта профільного опору консолей ротора від числа Рейнольдса, який був визначений за окружною швидкістю.

В розділі автором також показана необхідність правильного вибору співвідношення площ критичних перерізів тягового та підвідного сопел, що визначається коефіцієнтом відновлення повного тиску по довжині газового тракту. Для правильного його визначення була розроблена методика поелементного розрахунку газового тракту СРРМ, яка базувалася на розрахунку коефіцієнта відновлення повного тиску на кожній характерній ділянці.

Тенденцією останніх років є широке використання програмних комплексів для розрахунку газодинамічної структури течії будь-яких агрегатів. Постійно зростаючі потужності ЕОМ дозволяють швидко та з прийнятною точністю

отримувати розв'язок рівняння Нав'є-Стокса методом кінцевих об'ємів. В даній роботі наведено чисельне дослідження процесу течії газу в тракці СРРМ на пусковому режимі за допомогою програмного комплексу 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%).

Третій розділ носить експериментальний характер, в ньому автор приводить опис експериментального стенду, вимірювальних приладів, методики обробки результатів експерименту та аналіз похибок вимірювань.

Згідно методики (розділ 2) спочатку було виконане дослідження підвідного сопла, а саме отримано значення коефіцієнту витрати при різних положеннях голки і тисків на вході. Осереднене його значення склало 0,9. 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).

В розділі також був досліджений вплив на робочі характеристики зазору між робочим колесом та корпусом пневмоагрегата. За результатами холостого ходу дані рекомендації з вибору значень зазору ( $\Delta > 10$  мм).

У розділі також наведена методика обробки експериментальних даних. За результатами яких була побудована безрозмірна, універсальна залежність коефіцієнту профільного опору консолей ротора від числа Рейнольдса, який визначався по окружній швидкості. У розділі були виконані відповідні висновки і рекомендації.

Четвертий розділ присвячений виключно практичним рекомендаціям зі створення струминно-реактивних пневмоагрегатів. 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 розділі представлений кінематичний розрахунок пневмопривода шарового крану DN 500 PN 80 з двома різними механізмами редукції: гвинто-кулісним та прецесійним. Виконано порівняння отриманих пневмоприводів за масогабаритними показниками та показниками економічності між собою та з серійними пневмогідроприводами.

Висновки по роботі. В роботі п'ять висновків, вони узагальнюють висновки по розділах і підсумовують результати дослідження в цілому. Усі вони у логічному порядку показують творчий шлях здобувача і його успіхи у науковому

пізнанні робочого процесу СРРМ на основі чисельного дослідження течії газу в проточній частині пневматичного двигуна та експериментальних досліджень, що обґрунтовано характеристиками фізичного експерименту. За обсягом і структурою представлена дисертаційна робота відповідає установленим вимогам.

Структура подання матеріалу в авторефераті відповідає необхідним вимогам. Основні положення дисертації викладені в авторефераті логічно, чітко і ясно. Зміст автореферату об'єктивно відображає основні положення дисертації. Розбіжності між суттю дисертації й автореферату не виявлені.

### **5. Зауваження по роботі**

За змістом дисертаційної роботи слід зробити наступні зауваження:

1. З аналізу літературних джерел не досить достатньо висвітлений закордонний досвід створення пневмоагрегатів на базі струминно-реактивної розширювальної машини;

2. Відпрацьована методика чисельного дослідження газового тракту СРРМ представлена не в достатньому обсязі, доцільно було б розширити робочі режими;

3. Для більш обґрунтованого аналізу течії газу у проточній частині СРРМ необхідно було навести розподіл термодинамічних характеристик потоку;

4. В тексті дисертаційної роботи часто зустрічаються посилання на розроблені автором прикладні програми, які дозволяють отримувати характеристики СРРМ, тому бажано було б навести їх у додатках;

5. Отриману залежність коефіцієнта профільного опору треба було б проаналізувати, порівняти значення з відповідним значенням для обтікання стійок різних поперечних перерізів та дати рекомендації щодо оптимальної форми поперечного перерізу;

6. Для досягнення ККД струминно-реактивної розширювальної машини в 60% необхідно було б навести баланс втрат, що дозволило цілеспрямовано вибрати шляхи вдосконалення пневматичного двигуна.

### **6. Висновок**

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

1. Дисертація є завершеною працею, в якій має місце вирішення важливих задач в дослідженні робочого процесу СРРМ. Викладення матеріалу в тексті дисертації чітке й послідовне. Робота оформлена у відповідності до необхідних норм і вимог;

2. Тема дисертаційної роботи являється актуальною і відповідає паспорту спеціальності 05.05.17 - «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати»;
3. Результати, що представлені автором в дисертаційній роботі, мають наукову новизну і практичну цінність;
4. Отримані результати являються достовірними. Здобувач обґрунтував проведені дослідження і підтвердив їх експериментальними результатами з використанням фундаментальних законів механіки рідини та газу;
5. Автореферат повністю висвітлює зміст дисертаційної роботи.

Вважаю, що висловлені зауваження не знижують важливості основних досягнень здобувача. Дисертацію Бережного О. С. оцінюю позитивно. Робота є завершеним науковим дослідженням і вносить вклад в подальше поглиблення в теорію робочого процесу СРРМ в питаннях проектування пневматичних приводів на основі отриманих залежностей.

Дисертаційна робота «Удосконалення робочих характеристик струминно-реактивного пневмоагрегата на основі уточнення моделі робочого процесу» являється завершеною роботою, яка повністю відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», 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,  
кандидат технічних наук,  
доцент кафедри «Гідравлічні машини»  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»



Дранковський В. Е.

Підпис <i>Ю. І. Зайцев</i>
ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР <i>Ю. І. Зайцев</i>
р. _____

ЗАЙЦЕВ Ю. І.
--------------