

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента доктора технічних наук**  
**Кононенка Анатолія Петровича**  
**на дисертаційну роботу Гетало Віктора Валерійовича**  
**«Вдосконалення систем редукування тиску шляхом використання**  
**струминно-реактивних пневмоагрегатів»,**  
**подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за**  
**спеціальністю 05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати**

**1. Актуальність теми**

Виходячи з актуальності питань енергозбереження на даний час в Україні, як і у багатьох країнах світу, приділяється значна увага корисному використанню енергії надлишкового тиску природного газу, розробкам та впровадженню відповідних установок. Такими на практиці в переважній більшості є турбодетандерні пневмоагрегати. Ці установки дозволяють знизити тиск до необхідного значення та перетворити надлишкову потенційну енергію стиснутих газів в механічну енергію на валу агрегату. Отримана механічна енергія може бути використана для приводу будь-яких машин (насосів, компресорів, вентиляторів) або перетворена в електричну енергію за допомогою електрогенератора.

Зниження тиску до необхідних технологічних значень в газовій промисловості України зазвичай забезпечується редукуючими пристроями, де фактично відбувається втрата надлишкової потенційної енергії. Враховуючи спожиту кількість природного газу в нашій країні, при подібному редукуванні втрати можуть бути достатньо значні. Це стосується, в першу чергу, газорозподільчих станцій та пунктів, де використовуються вказані технологічні операції і де можливо утилізувати енергію перепаду тиску шляхом виробництва, наприклад, електричної енергії. Особливо значний попит спостерігається на локальні енергоустановки, що спрацьовують перепад тиску для отримання електроенергії, які раціонально використовувати при потужностях менше 1 МВт, що характерно більшості газорозподільчих станцій України.

Автором дисертації запропоновано і обґрунтовано доцільність використання струминно-реактивних пневмоагрегатів для отримання електроенергії в якості утилізуючих установок у системах редукування тиску, що сприяє вирішенню проблеми енергозбереження.

Все вищевикладене обумовлює актуальність даної роботи, яка спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі, пов'язаної з вдосконаленням систем редукування тиску шляхом використання струминно-реактивного пневмоагрегату і визначенням раціональних геометричних співвідношень його елементів та зон стійкої роботи в умовах газорозподільчої станції.

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

Наукові положення дисертаційної роботи слід вважати достатньо обґрунтованими, оскільки теоретичні дослідження базуються на основних законах та рівняннях збереження енергії, нерозривності та кількості руху, стану газу, зміни моменту кількості руху, застосуванні апробованих методів чисельного розв'язання рівнянь гідродинаміки, достатнім рівнем адекватності математичних моделей (розбіжність розрахункових та експериментально отриманих результатів не перевищує 7%).

Експериментальні дослідження виконані з використанням сучасних засобів вимірювання, методів планування експериментів і статистичного аналізу експериментальних даних. Використання достатньої кількості паралельних вимірювань дозволяє цілком довіряти отриманим експериментальним результатам.

Результати досліджень, а також висновки і рекомендації роботи в цілому базуються на комплексному використанні аналітично-розрахункового і експериментального методів, є достатньо обґрунтованими та достовірними.

У дисертації отримані значні наукові та практичні результати, що стосуються обґрунтування доцільності використання струминно-реактивних пневмоагрегатів в складі систем редукування тиску та виявлення резервів підвищення їх енергетичної ефективності. До основних нових наукових положень представленої дисертаційної роботи правомірно віднести:

- встановлено, що для підвищення ефективності роботи 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;

- 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;

- 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.

Таким чином, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, може бути оцінений як достатній. Наявність наукової новизни й практичної цінності результатів, отриманих у роботі, сумнівів не викликає.

### **3. Оцінка змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 150 сторінок. Дисертаційна робота містить 40 рисунків, 11 таблиць, 4 додатки і список використаних джерел у кількості 136 найменувань на 15 сторінках. Таким чином, об'єм дисертаційної роботи відповідає встановленим нормам обсягу.

У **вступі** представлена загальна характеристика роботи. Структура вступу відповідає затвердженим вимогам. Проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, визначено мету, об'єкт і предмет дослідження та методи, що використані в дисертаційній роботі, сформульовано завдання, які необхідно розв'язати для вирішення наукової задачі, подано наукові і практичні результати роботи, надана інформація щодо особистого внеску здобувача в вирішенні поставлених в роботі завдань, наведені дані щодо апробації роботи, кількість публікацій за темою дисертації та її кількісні параметри.

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

Здобувачем виконаний аналіз використання турбодетандерних утилізаційних пневмоагрегатів та проведений огляд конструкцій вітчизняних і зарубіжних зразків.

Велика кількість енергії надлишкового тиску газу втрачається на вузлах редукування в системах видобутку, транспорту, розподілу та переробки природного газу. Одним з найбільш важливих аспектів цієї проблеми є те, що редукуючі системи (наприклад, на газорозподільчих станціях і пунктах) являють собою порівняно прості технологічні об'єкти – регулятори тиску. Якісною альтернативою регуляторам тиску газу і редукуючим пристроям є утилізуючі системи, що базуються на турбодетандерних електрогенераторних установках і агрегатах. Дані системи забезпечують одночасно зниження і регулювання тиску газу при його розширенні, а також отримання механічної роботи на валу з перетворенням її в електроенергію.

Автор відзначає, що турбодетандерні утилізуючі системи на базі класичних лопаткових розширювальних машин (осьових, доцентрових і часто

багатоступеневих) перетворюють газорозподільчі станції в складне енергетичне виробництво. В Україні з 1449 функціонуючих газорозподільчих станцій тільки на 35 можливе отримання корисної потужності більше 2,5 МВт. Для решти газорозподільчих станцій потрібні утилізуючі системи малої і середньої потужності, тому що їх потужність менше 1 МВт.

Головна задача при цьому полягає в застосуванні такого типу розширювальної машини, яка має бути проста по конструкції з можливістю освоєнням звичайним виробництвом, надійна в експлуатації, не вимагати складних допоміжних систем, включаючи систему підготовки газу перед турбіною, тобто бути стійкою до ерозійного зносу та гідратоутворенню. Адже висока вартість турбодетандерних утилізуючих систем на основі класичних лопаткових розширювальних машин і порівняльна складність їх експлуатації та ремонту, пов'язані саме з розширювальною машиною, котра вимагає відповідних складних допоміжних систем, що забезпечують її надійну роботу і необхідний ресурс.

Виконаний аналіз стану технічного питання дозволив здобувачеві запропонувати, як доцільних в цих умовах, використання редукуючих систем на газорозподільчих станціях і пунктах на основі струминно-реактивних пневмоагрегатів.

Виходячи з вищевикладеного, здобувачем сформульовано мету дисертаційної роботи - підвищення енергоефективності роботи системи редукування тиску шляхом використання струминно-реактивного пневмоагрегату і уточнення його робочого процесу.

**У другому розділі** встановлено характер і особливості процесів, що протікають у струминно-реактивному пневмоагрегаті та в проточній частині розширювальної машини.

На основі теорії адіабатної течії газу з тертям у трубі автором обґрунтовано, що для течії в газовому тракті 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, що мінімізує енергетичні втрати.

Існуючу методику розрахунку характеристик струмино-реактивної розширювальної машини уточнено за рахунок введення в математичну модель коефіцієнта стиснення газу, що дозволило більш точно визначити її параметри та характеристики.

Оскільки тягові консолі ротора струмино-реактивної розширювальної машини обертаються в середовищі в'язкого газу, то здобувач розглянув деякі питання, пов'язані з аеродинамічним обтіканням. При обертанні ротора на тягові консолі діє сила лобового опору з боку робочого тіла, що знаходиться в корпусі машини, а також можливе досягнення критичних чисел Маха. При

виникненні надзвукових швидкостей на профілях плечей турбіни відбувається гальмування потоку на диффузорній частині профілю через стрибки ущільнення, тобто настає хвильова криза.

Розроблена методика виявлення зони хвильової кризи та рекомендації по розширенню області ефективної роботи струминно-реактивного пневмоагрегату. Методика використовувалася для аналізу роботи промислового зразка пневмоагрегату та підтверджена результатами експериментальних досліджень.

**У третьому розділі** наведені схеми експериментальних установок, методика проведення і обробки експериментальних досліджень та їх результати.

Правильний вибір вимірювальних приладів, планування та проведення експериментальних досліджень дозволили забезпечити достатню (для наукових досліджень) точність отриманих даних.

В ході проведення експериментальних досліджень дисертантом отримані наступні результати:

- досліджений пусковий режим і побудовані графічні залежності питомого пускового моменту від ходу голки підвідного сопла для двох моделей розширювальної машини, які відрізняються площиною тягових сопел;

- досліджений діапазон зміни ходу голки підвідного сопла, при якому ефективність роботи струмино-реактивної розширювальної машини (питомий пусковий момент) максимальна, та встановлено, що область максимальної ефективності знаходиться в діапазоні відношення площин критичних перерізів підвідного і тягових сопел  $0,85 \div 0,95$ ;

- автором, при аналізі експериментальних даних, побудовані вихідні характеристики, а саме: залежності крутного моменту, потужності і ККД розширювальної машини від частоти обертання ротора;

- побудовані для різних режимів роботи графічні залежності електричної потужності від частоти обертання валу генератора для дослідного зразка струмино-реактивного пневмоагрегату при використанні його на газорозподільчій станції та встановлені зони нестійкої роботи (у хвильовій кризі);

- свою методику автор використав для розроблення рекомендацій по виключенню зон нестійкої роботи агрегату.

Вважаю, що проведеними експериментальними дослідженнями дисертант досягнув поставленої мети та встановив основні напрямки для подальших напрацювань у цій області.

**В четвертому розділі** розроблено методику та проведені дослідження робочого процесу пневмоагрегату за допомогою програмного комплексу FlowVision.

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

Розроблена математична модель течії газу в струмино-реактивному пневмоагрегаті, адекватність якої підтверджено експериментальними дослідженнями.

В дисертаційній роботі детально викладені етапи виконання чисельних досліджень від побудови твердотілої моделі до порівняльного аналізу з експериментальними даними. Необхідно зазначити, що результати розрахунку пускового режиму та при роботі пневмоагрегату на повітрі для різних частот обертання ротору підтверджені обробленими результатами експериментальних досліджень з відносною похибкою, що не перевищила 7%.

Також був досліджений режим роботи струминно-реактивного пневмоагрегату в умовах газорозподільчої станції. Порівняльний аналіз результатів чисельного розрахунку за допомогою програмного комплексу FlowVision та випробувань на натурному стенді показав задовільний збіг (відносна похибка не перевищила 3%).

**Висновки** дисертації відповідають поставленим завданням дослідження та підсумовують результати виконаної роботи.

#### **4. Зауваження до дисертаційної роботи**

1. Вважаю, що у першому розділі дисертації (літературному огляді) недостатньо обґрунтована область можливого застосування струминно-реактивної розширювальної машини щодо діапазонів тиску та витрати газу.

2. У другому розділі дисертації побудований графік залежності коефіцієнта відновлення повного тиску від довжини циліндричної ділянки при різних значеннях коефіцієнта швидкості, який представляє лише якісну картину процесів, що відбуваються. Вважаю, що потрібно відобразити і кількісну складову.

3. В роботі автор багато уваги приділяє питанням, пов'язаним з проектуванням струминно-реактивної розширювальної машини та розробкою рекомендацій за результатами експериментальних досліджень. З точки зору кращого сприйняття інформації в дисертації було б доцільно винести питання, пов'язані з проектуванням розширювальної машини, в самостійний пункт розділу.

4. В роботі не наведено формульного розрахунку терміну окупності струмино-реактивного пневмоагрегату, а лише наведено орієнтовне значення.

5. При аналізі отриманих результатів роботи доцільно було б окреслити напрямки подальших досліджень і можливих ідей для підвищення ефективності використання струмино-реактивної розширювальної машини, як складової

систем редукування надлишкового тиску природного газу на газорозподільчих станціях.

Висловлені зауваження не впливають на представлення роботи як цілісної та закінченої наукової праці, на наукову новизну та практичну цінність отриманих дисертантом основних результатів проведених досліджень та не потребують її доробки чи переробки.

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

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

Апробація результатів досліджень та складових дисертації достатня. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та знайшли схвальну оцінку на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях.

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. Опубліковані роботи в повній мірі відображають теоретичні та практичні результати роботи. Кількість публікацій по темі дисертації відповідає необхідній кількості на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Бесіда зі здобувачем дає право підтвердити, що заявлений особистий внесок здобувача відповідає дійсності, а підготовка та написання дисертації виконані особисто.

## **6. Висновок**

Дисертаційна робота Гетало Віктора Валерійовича «Вдосконалення систем редукування тиску шляхом використання струминно-реактивних пневмоагрегатів» є закінченою науковою працею, що виконана автором особисто у вигляді рукопису. Наукові та прикладні положення, установлені закономірності, практичні рекомендації, які одержані в роботі, містять нові рішення важливої науково-технічної задачі, направленої на підвищення енергоефективності системи редукування тиску шляхом використання струмино-реактивного пневмоагрегату та уточнення його робочого процесу при дослідженні характеристик і мають важливе значення для часткового вирішення проблеми енергозбереження за рахунок використання енергії надлишкового тиску природного газу.

Рівень теоретичних розробок та проведених експериментальних досліджень, наукова новизна та практична цінність результатів роботи повністю відповідає вимогам п.п. 9, 11 та 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання кандидата технічних наук”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України.

Виконана дисертаційна робота повністю відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати, а її автор Гетало Віктор Валерійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри енергомеханічних систем  
Державного вищого навчального закладу  
“Донецький національний технічний університет”,  
доктор технічних наук, професор

А.П. Кононенко

