

## ВІДГУК

офіційного опонента к.т.н., доцента Білоусова Є.В.  
на дисертаційну роботу Рижкова Ростислава Сергійовича «Створення  
високоефективного турбоімпаکتного сепаратора стиснутих газів для  
газотурбінних установок», подану на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки»

### 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

#### Структура та обсяг дисертації.

Робота виконана на кафедрі турбін Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку джерел та додатків. Дисертація містить 166 сторінок машинописного тексту, 126 найменувань використаних джерел, 53 рисунка і 14 таблиць. У додатках наведені акти впровадження результатів роботи.

**Оформлення дисертації.** Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

Матеріал дисертації подано в логічній послідовності відповідно до поставлених задач дослідження, їх рішення розкрито повністю, текст викладено грамотною технічною мовою. Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій.

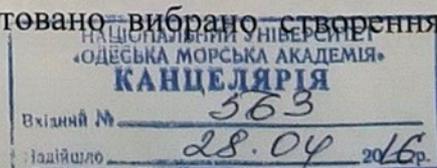
Зміст автореферату ідентичний змістові дисертації і відображає основні положення роботи. Вимоги до оформлення автореферату і його розсилання дотримані.

**Зміст дисертації, об'єкт і предмет** дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки (за напрямками: п.2 – «Фізичне та математичне моделювання, системний аналіз і синтез термодинамічних, гідродинамічних, газодинамічних, електродинамічних, електрохімічних та інших процесів у двигунах, енергоустановках і їх елементах»; п.6 – «Системи й агрегати двигунів і енергетичних установок. Методи їх проектування та дослідження»; п. 12 – «Методи, технічні засоби та системи поліпшення характеристик двигунів і енергоустановок за екологічними властивостями, зокрема показниками шуму, вібрації та шкідливих викидів»).

#### Зміст роботи

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та основні завдання дисертаційної роботи, визначено наукову новизну, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, відображено повноту їх викладення в публікаціях та ступінь їх апробації на конференціях.

У першому розділі проведено аналіз проблем очистки стиснутих газів в газотурбінних установках. Розглянуто джерела забруднення стиснутих газів, що використовуються у якості палива для ГТУ, проаналізовано основні схеми їх очищення гідродинамічними методами. Одним з напрямів підвищення ефективності використання енергоресурсів обґрунтовано вибрано створення



турбоімпактних сепараторів паливного газу підвищеного тиску.

**У другому розділі** автором обґрунтовано напрямки наукового дослідження, поставлено основне та додаткові завдання. Розглянуто основні методи досліджень процесів очищення стиснутих газів для газотурбінних установок. Запропоновано та адаптовано узагальнену математична модель, що дозволяє розраховувати особливості робочого процесу сепараторів стиснутих газів для ГТУ. Автором приведено опис створених ним стендів для експериментальних досліджень процесів очищення стиснутих газів у вигляді відкритих аеродинамічних труб з моделюванням середовища підвищеного тиску та в атмосферних умовах.

**Третій розділ** дисертації присвячено розробленню узагальненої багатоступінчастої схеми комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів за рахунок підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу, диффузіофорезу і в відривних зонах. Розроблено і досліджено три конструктивні схеми турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок, які відрізняються інтервалами між поверхнями осадження та розмірами ступенів очищення: відповідно 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра вхідного конфузору. Виконано теоретичні дослідження ефективності процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпактному струминному сепараторі очищення стиснутих газів ГТУ.

**У четвертому розділі** виконано тривимірні дослідження гідродинамічних характеристик турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ. Для цього автор розробив відповідні розрахункові моделі першого ступеня очистки сепараторів та уніфікованого сепаратора в цілому. За допомогою сучасних систем обчислювальної гідродинаміки автор провів дослідження ефективності очищення в турбоімпактному струминному модулі, гофрованому сепараційному модулі та в уніфікованому сепараторі. Відмічу, що автор розробив оригінальний уніфікований сепаратор паливного газу ГТУ з максимальною ефективністю очищення. Теоретичні дослідження його робочого процесу показали, що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції в ньому дорівнює 85...99 %.

**П'ятий розділ** присвячено дослідженням ефективності турбоімпактних сепараторів стиснутих газів на експериментальних стендах та впровадженню результатів дисертації. Для практичного використання на газотурбобудівних підприємствах України розроблено, виготовлено та досліджено дослідний зразок турбоімпактного сепаратора паливного газу ГТУ та дослідний зразок масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу. Наведено порівняння коефіцієнтів ефективності очищення, які отримані теоретичним шляхом застосуванням запропонованої математичної моделі процесів турбоімпактного переносу та при виконанні експериментальних досліджень. Представлені результати свідчать про задовільну кореляцію експериментальних і теоретичних результатів. Виконано впровадження турбоімпактних сепараторів стиснутих газів в ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект" (м. Миколаїв). Розроблено робочі креслення турбоімпактного сепаратора паливних газів для ГТД типу

ДГ80Л, ДН-80 та турбоімпактного масловіддільника для очищення газу системи суфлювання ГТУ замкнутого тиску (типу "Аксамит").

У **висновках** узагальнено основні наукові і практичні результати, що визначають наукову новизну й практичну цінність дисертації.

На підставі викладеного можна зробити висновок про те, що дисертаційна робота Рижкова Р.С. містить всі необхідні розділи: оглядовий, теоретичний, експериментальний, розділ, пов'язаний з узагальненням та впровадженням результатів досліджень. Мета, поставлена в дисертаційній роботі, досягнута в результаті виконання всіх намічених завдань.

## 2. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

Актуальність теми обумовлена проблемами підвищення ефективності використання енергоресурсів в Україні та інших країнах. Одним із перспективних напрямів підвищення економічності, екологічності та надійності газотурбінних установок є створення вискоелективних турбоімпактних сепараторів паливного газу високого тиску та сепараторів масла систем суфлювання перспективних ГТУ замкнутого циклу, що потребує вдосконалення методів інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу полідисперсної фази при очищенні багатозначних сумішей паливного газу та стиснутого повітря для сучасних газотурбінних енергетичних систем.

Актуальність теми дисертації підтверджується її зв'язком з пріоритетними напрямками розвитку науки й техніки в Україні, напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність», з тематичним планом фундаментальних і прикладних науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування, в яких автор брав участь в якості виконавця на посаді молодшого наукового співробітника.

## 3. СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНІСТІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

**Методологічну основу** дослідження становить теоретико-експериментальний підхід по вдосконаленню характеристик пристроїв очистки стиснутих газів для газотурбінних установок, що працюють вуглеводневому паливі.

**Фізичну основу** дослідження становлять процеси турбоімпактної очистки стиснутих газів для ГТУ під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу, дифузіофорезу і в відривних зонах.

**Математичний апарат дисертації.**

Адаптовано узагальнену математичну модель для розв'язання задач сепарації стиснутих газів на основі загального транспортного рівняння переносу змінної величини, засновану на усередненні системи рівнянь в частинних похідних, що описують універсальні закони збереження маси, енергії, імпульсу в турбулентній багатозначній системі.

Коректність фізичної та математичної постановки дослідження забезпечує достатній рівень обґрунтованості наукових результатів і висновків.

#### 4. ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Достовірність наукових результатів забезпечується застосуванням сучасних методів і засобів, адекватністю прийнятих припущень фізичної моделі і реальних процесів, які відтворювалися на розроблених автором стендах і вивчалися за допомогою сучасних засобів вимірювання, задовільним узгодженням результатів розрахунків з експериментальними даними, а також результатами стендових і натурних випробувань. Отримані в роботі результати є логічними і не суперечать практиці проектування сепараторів газу для газотурбінних установок.

#### 5. НОВИЗНА НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

**Наукове значення** роботи полягає в удосконаленні теоретичного підґрунтя інтенсифікації процесів турбоімпадного переносу в сепараторах газів газотурбінних установок, подальшому розвитку фізичних і математичних моделей гідродинамічних процесів комплексного очищення стиснутих газів.

**Нові наукові результати** полягають в наступному:

*Вперше:*

1. Розроблено узагальнену багатоступінчасту схему комплексної турбоімпадної інтенсифікації очищення стиснутих газів для газотурбінних установок шляхом підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу, дифузіїфорезу і в відривних зонах.

2. Встановлено основні гідродинамічні характеристики запропонованих турбоімпадных сепараторів стиснутих газів різних конструктивних схем при варіюванні відстанню між поверхнями осадження та розмірами ступенів очищення: 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра входного конфузору, які дозволяють визначати найбільш ефективну послідовність здійснення стадій очищення.

3. Виявлено розподіл швидкості та кінетичної енергії турбулентності у робочих каналах турбоімпадного струминного модуля та гофрованого сепараційного модуля сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок в діапазоні витрат робочого середовища 500...2200 кг/год.

4. Встановлено, що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції в турбоімпадному струминному модулі сепаратора очищення паливних газів для ГТУ після гофрованого сепараційного модуля складає 70...80 %.

5. Доведено теоретичним шляхом та експериментом, що сумарна ефективність очищення від полідисперсних фракцій в уніфікованому турбоімпадному сепараторі паливних газів для ГТУ без використання гофрованого коагулятора в першому ступені очищення дорівнює 82...88 %, а з його використанням 98...99,5 %.

#### 6. ЗНАЧЕННЯ ОТРИМАНИХ В РОБОТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ДЛЯ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ

**Теоретичне значення** мають наступні результати дослідження:

- узагальнена багатоступінчаста схема комплексної турбоімпадної інтенсифікації очищення стиснутих газів для газотурбінних установок;

- фізична та теоретична моделі процесів інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу в сепараторах газів газотурбінних установок;
- виявлені особливості впливу режимних і геометричних параметрів турбоімпактних сепараторів на ефективність очистки стиснутих газів для ГТУ.

**Практичну цінність** становлять:

- адаптована математична модель турбоімпактного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок;
- конструктивні схеми турбоімпактного сепаратору паливного газу ГТУ та масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу;
- методика обчислювального експерименту для вдосконалення характеристик турбоімпактних сепараторів;
- дослідні зразки турбоімпактних сепараторів паливних газів для ГТУ стаціонарного типу та масловіддільників систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу;
- рекомендації з проектування турбоімпактних сепараторів для ГТУ для газотурбобудівних підприємств України.

## **7. ШЛЯХИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Отримані в роботі результати, передусім, дослідні зразки турбоімпактних сепараторів паливних газів для ГТУ стаціонарного типу та масловіддільників систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу використовуються в ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» при модернізації існуючих і проектуванні перспективних зразків ГТД, що працюють на органічних паливах. Рекомендації з проектування систем очистки стиснутих газів використовуються в Академії наук суднобудування України при проектуванні природоохоронних систем, а також в навчальному процесі і виконанні наукових досліджень в НУК імені адмірала Макарова. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає біля 150 тис. доларів США.

Результати досліджень можуть бути рекомендовані до користування підприємствами газотурбобудівної галузі, зокрема АТ «Мотор-Січ» та ДП «Запорозьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес»».

## **8. ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Зміст дисертації відповідає напряму у галузі двигунів та енергетичних установок, пов'язаному з поліпшенням характеристик двигунів і енергоустановок. Одержані автором теоретичні та прикладні результати у сукупності вирішують поставлену науково-прикладну задачу створення високоефективного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок на основі запропонованих схемних рішень з очищення стиснутих газів і методів інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу, що свідчить про завершеність наукового дослідження.

Подання матеріалу в логічній послідовності з обґрунтуванням і узагальненням результатів у вигляді висновків по розділах і загальних висновків сприяє її сприйняттю як цілісного дослідження.

Наведені в роботі результати одержані автором особисто.

## **9. ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ**

За темою дисертації опубліковано 33 наукові праці, із них 7 статей в спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, які входять в перелік, затверджених ДАК України, а також до наукометричних баз, 1 патент України на корисну модель, 24 матеріали в збірниках міжнародних конференцій, 1 наукова робота, що отримала Премію Верховної Ради України.

Основні результати роботи позитивно оцінені на науково-технічних конференціях: 3 і 4 міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ; 2 та 4 міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», м. Миколаїв, 2011 та 2013 р.; 7-10 міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні», м. Миколаїв, 2012-2015 р.

## **10. ЗАУВАЖЕННЯ ДО РОБОТИ**

В якості зауважень можна відмітити.

1. В таблиці 1.2 розділу 1 приводяться основні характеристики сучасних способів очистки стиснутих газів, але не наводяться дані, що характеризують ефективність пристроїв, що реалізують турбоімпактний принцип очистки.

2. З аналізу, зробленого в розділі 1, не зовсім зрозуміло, яким чином пропонується застосовувати турбоімпактні сепаратори стиснутих газів в схемах перспективних газотурбінних установок закритого циклу.

3. Існує достатня велика кількість рівнянь, що описують турбулентні показники потоків (так званих моделей турбулентності). Автор використав стандартну  $k-\epsilon$  модель турбулентності без достатнього, на мій погляд, обґрунтування. Не ясно, як би відрізнялися розрахункові гідродинамічні показники сепараторів при використанні інших моделей.

4. В дисертації запропоновано досліджувати три основні схемних рішення турбоімпактних сепараторів стиснутого газу (таблиця 3.1). Потенційно можна запропонувати й інші конструктивні схеми. На жаль, в тексті відсутні обґрунтування вибору досліджуваних схемних рішень, а просто констатується даний факт.

5. Для проведення теоретичних розрахунків гідродинамічних показників турбоімпактних сепараторів автор вибрав значення тиску 1,96 МПа. На режимах часткових навантажень значення тиску перед сепаратором паливного газу буде змінюватися, тому буде дещо змінюватися і аеродинамічна картина течії в сепараторі, що безумовно приведе до зміни ефективності очищення газів. Такі особливості в роботі не досліджувались, але вони є достатньо вагомими. Це зауваження можна вважати побажанням для проведення майбутніх досліджень з даної тематики.

6. Наявність гофрованого сепараційного модулю в складі турбоімпактного сепаратора паливних газів ГТУ збільшує гідравлічний опір всього пристрою для очистки, тому, можливо, було б доцільним виявити шляхи зменшення гідравлічних втрат за рахунок раціонального вибору геометричних

розмірів сіткових елементів: кількості рядів проволочки, діаметру і т.д.

7. На графіках рис. 4.8-4.10 розрахункове значення коефіцієнту осадження полідисперсної фракції при витраті робочого середовища 1500 кг/год для першого варіанту конструктивної схеми сепаратора дещо відрізняється від загальної тенденції зміни параметрів. На мій погляд, це можна пояснити деякою нестабільністю самого числового рішення системи диференційних рівнянь.

8. Порівняння експериментальних і розрахункових значень коефіцієнта ефективності очищення сепаратора з використанням та без використання гофрованого коагулятора дозволили автору обґрунтовано стверджувати про задовільну кореляцію експериментальних і теоретичних результатів, але, на жаль, не приведено подібних порівняльних даних для оцінки гідравлічних втрат.

9. Запропоновані та досліджені у роботі сепаратори газу турбоімпаکتного типу, безумовно можуть бути застосовані в інших галузях техніки де стикаються з аналогічними задачами. У зв'язку з цим було би цікаво надати питомі показники цих сепараторів, для більш об'єктивного їх порівняння з іншими аналогічними агрегатами.

Відмічені зауваження по дисертаційній роботі ні в якій мірі не знижують її наукового рівня і цінності отриманих результатів.

### 11. ВІДПОВІДНІСТЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВСТАНОВЛЕНИМ ВИМОГАМ

В результаті вивчення представленої дисертаційної роботи, автореферату і наукових праць, вважаю, що науковий рівень та повнота викладення дисертаційної роботи відповідають вимогам ДАК МОН України щодо дисертацій, поданих на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (п. 11, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника»), наведені в ній науково обґрунтовані результати у сукупності вирішують важливу для енергетики науково-прикладну задачу створення високоефективного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок на основі запропонованих схемних рішень з очищення стиснутих газів і методів інтенсифікації процесів турбоімпаکتного переносу, а її автор, Рижков Ростислав Сергійович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки».

Декан факультету суднової енергетики Херсонської державної морської академії, доцент кафедри «Експлуатації суднових енергетичних установок та загальної інженерної підготовки», к.т.н., доцент

Є. В. Білоусов

Підпис *Білоусов Є. В.* АВДІЛ  
засвідчую *Білоусов Є. В.* РІВ  
начальник відділу кадрів ХДМА



*Handwritten signature*