

Міністерство освіти і науки України
(МОН України)

Національний університет “Одеська морська академія”
(НУ «ОМА»)



РИЖКОВ РОСТИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.12.03

**СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ТУРБОІМПАКТНОГО
СЕПАРАТОРА СТИСНУТИХ ГАЗІВ ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ
УСТАНОВОК**

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сербін Сергій Іванович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, м. Миколаїв, директор Машинобудівного інституту НУК, професор кафедри турбін

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Варбанець Роман Анатолійович,
Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, м. Одеса, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації

кандидат технічних наук, доцент
Білоусов Євген Вікторович,
Херсонська державна морська академія, Міністерство освіти і науки України, м. Херсон, декан факультету суднової енергетики, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки

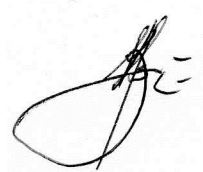
Захист відбудеться «18» травня 2016 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті “Одеська морська академія” за адресою: вул. Дідріхсона, 8, корп. 1, зал засідань вченої ради, м. Одеса, 65029.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Одеська морська академія” за адресою: вул. Дідріхсона, 8, корп. 2., м. Одеса, 65029 та за електронною адресою:

http://onma.edu.ua/index.php?quater_ua

Автореферат розісланий « 18 » квітня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



В. В. Нікольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. В енергетичних установках нових поколінь: газо- і газопаротурбінних (ГТУ і ГПТУ), а також перспективних ГТУ замкнутого циклу особливо гостро стоїть проблема очищення газоподібного палива від рідкої фази, оскільки при її підвищених концентраціях знижується економічність, довговічність, а також погіршуються експлуатаційні характеристики установок. Підвищення якості очищення стиснутих газів дозволяє не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища, а й знизити споживання палива утилізацією низькопотенційної енергії газових викидів, скоротити втрати цінних матеріалів.

Розглядом різних аспектів цієї проблеми займаються у багатьох університетах, проектних та конструкторських організаціях як у нас в країні: ІТТФ НАНУ, НТУУ «КПІ» (м. Київ), ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», НУК ім. адмірала Макарова (м. Миколаїв), ДП Запорізьке МКБ «Прогрес» (м. Запоріжжя), Selton (м. Київ), так і за кордоном: General Electric Company (США), Siemens Westinghouse (Німеччина), British Gas (Великобританія), Центральний котлотурбінний інститут ім. Ползунова (Росія), Інститут теплообміну (Білорусь).

При експлуатації сучасних ГТУ, що працюють на газоподібному паливі, наприклад в складі газокompресорних станцій та теплових електростанцій, виникають серйозні проблеми, пов'язані з попаданням газового конденсату в проточну частину двигуна. В ряді випадків це може викликати оплавлення і навіть прогоряння паливних пристроїв камер згоряння в результаті локального впливу високих температур, спричинених горінням рідких фракцій вуглеводнів. Найбільш інтенсивне утворення газового конденсату відбувається при тисках 2,0-4,0 МПа, характерних для сучасних камер згоряння газотурбінних двигунів (ГТД).

Тому створення високоефективних турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів для ГТУ є **актуальною науково-прикладною задачею** і значним резервом поліпшення використання паливно-енергетичних ресурсів та підвищення надійності експлуатації установок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано автором-аспірантом кафедри «Турбін» машинобудівного інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) в рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні, напрямом 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних робіт НУК за держбюджетною темою № 1894 «Основи турбоімпульсної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищеного тиску для енергетичних установок», номер держреєстрації № 0113U000241, та за госпрозрахунковою темою № 1875 «Розробка сепаратора для первинної очищення паливних газів від твердої та рідкої фракцій», номер держреєстрації № 0111U009084, в яких автор брав участь в якості виконавця на посаді молодшого наукового співробітника.

Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в системах очищення

стиснутих газів енергетичних систем та установок.

Предмет дослідження – характеристики гідродинамічних процесів турбоімпульсної інтенсифікації переносу полідисперсного середовища при очищенні стиснутих газів для газотурбінних установок.

Метою наукового дослідження є створення високоефективного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок на основі запропонованих схемних рішень з очищення стиснутих газів і методів інтенсифікації процесів турбоімпульсного переносу.

Основні задачі наукового дослідження:

- аналіз ефективних схем очищення стиснутих газів та вибір перспективних напрямків зі створення гідродинамічних сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок;
- адаптація математичних моделей гідродинамічних процесів та переносу полідисперсного середовища в сепараторах стиснутих газів на основі сучасних пакетів обчислювальної гідродинаміки до умов експлуатації ГТУ;
- розробка узагальненої схеми очищення стиснутих газів з використанням комплексної турбоімпульсної інтенсифікації;
- розробка схемних рішень пристроїв турбоімпульсної сепарації стиснутих газів та проведення їх теоретичних досліджень на основі адаптованої математичної моделі;
- проведення тривимірних досліджень гідродинамічних особливостей сепараторів стиснутих газів для ГТУ, вибір раціональних конструктивних схем;
- створення дослідних зразків турбоімпульсних сепараторів для очищення паливних газів ГТД та системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу, розробка програми їх експериментальних досліджень;
- розробка експериментальних стендів для дослідження процесів в сепараторах стиснутих газів для ГТУ;
- проведення експериментальних досліджень ефективності турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів для ГТУ;
- верифікація адаптованої математичної моделі процесів очищення стиснутих газів та розробка рекомендацій з проектування сепараторів;
- розробка робочих креслень турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів для ГТУ, впровадження результатів дисертаційної роботи.

Методика і методи дослідження. Удосконалення характеристик сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок забезпечено теоретико-експериментальним розв'язанням дослідницьких завдань на єдиній методологічній основі. Розв'язання рівнянь математичних моделей турбулентного переносу в ступенях очищення турбоімпульсних сепараторів здійснено за допомогою методу контрольного об'єму з використанням комплексів обчислювальної гідродинаміки. Експериментальні дослідження газоочисних апаратів енергетичних систем та установок проведено в Національному університеті кораблебудування на спеціально створених стендах у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу з використанням лічильників часток та фотометрів аерозолів; розрахунок концентрацій дисперсної фази

здійснено ваговим методом за допомогою аналітичних фільтрів. При постановці дослідів використовувалася загальна теорія моделювання та планування експериментів, а при обробці даних та перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна:

Вперше:

1. Розроблено узагальнену багатоступінчасту схему комплексної турбоімпульсної інтенсифікації очищення стиснутих газів для газотурбінних установок шляхом підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу, дифузійфорезу і в відривних зонах; утворення плівки рідини з вловлених крапель з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння; осадження на сіткових гофрованих коагуляторах за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу та капілярних сил; уловлення зкоагульованих крапель, що виносяться потоком, за рахунок сил тяжіння та інерції на другому ступені очищення, де має місце відведення вловленої рідини у вигляді плівки через спеціальні канавки, розташовані на перегородці.

2. Встановлено основні гідродинамічні характеристики запропонованих турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів різних конструктивних схем (з центральним струменем та з багатоструминними системами перед коагулятором) при варіюванні відстанню між поверхнями осадження та розмірами ступенів очищення: 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра вхідного конфузору, які дозволяють визначати найбільш ефективну послідовність здійснення стадій очищення та раціональні геометричні та режимні параметри турбоімпульсних сепараторів.

3. Виявлено розподіл швидкості та кінетичної енергії турбулентності у робочих каналах турбоімпульсного струминного модуля та гофрованого сепараційного модуля сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок в діапазоні витрат робочого середовища 500–2200 кг/год. Встановлено, що швидкість в окремих ділянках сепаратора збільшується у 2–2,5 рази в порівнянні зі швидкістю потоку на його вході, що дозволяє інтенсифікувати осадження частинок за рахунок турбофоретичних ефектів. Показано, що зі збільшенням витрат робочого середовища для всіх схемних рішень спостерігається збільшення турбулізації потоку та розмірів зон зворотних вихорів та течій, що позитивно впливає на процеси осадження полідисперсних частинок.

4. Встановлено, що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції в турбоімпульсному струминному модулі першого ступеня сепаратора очищення паливних газів для газотурбінних установок складає 50-60 % і збільшується до 70-80 % після гофрованого сепараційного модуля. Зростання витрати робочого тіла приводить до збільшення величини коефіцієнта осадження внаслідок інтенсифікації турбулізації потоку та позитивного впливу турбофоретичного ефекту на осадження частинок.

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

його використанням 98–99,5 % при аеродинамічному опорі 0,7-3,2 кПа в діапазоні витрат робочого тіла 500–2200 кг/год.

Отримали подальший розвиток:

1. Підхід до визначення характеристик сепараторів стиснутих газів, заснований на числовому моделюванні робочих процесів, який відрізняється від відомих тим, що враховує особливості дій сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu та дифузіїфореzu, а також специфіку турбоімпактних систем підвищеного тиску.

2. Схемні рішення турбоімпактних масловіддільників підвищеного тиску, які містять турбоімпактний та гофрований коагуляційний модулі, для систем суфлювання, що дозволяють використовувати їх в ГТУ замкнутого циклу.

На основі отриманих наукових результатів сформульовано **наукове положення**: інтенсифікація турбоімпактного переносу на плоских та розвинутих поверхнях осадження за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu й у відривних зонах в послідовно розташованих ступенях очищення з утворенням плівки рідини з вловлених крапель і подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння забезпечує підвищення ефективності очищення стиснутих газів для газотурбінних установок від аерозольних часток.

Достовірність результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних методів і засобів, адекватністю прийнятих припущень фізичної моделі і реальних процесів, які відтворювалися на спеціальних стендах і вивчалися за допомогою сучасних засобів вимірювання неконтактного типу, 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 двигунів.

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

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці та створенні ефективних, екологічно чистих і ресурсозберігаючих турбоімпактних сепараторів паливних газів для ГТУ стаціонарного типу та масловіддільників систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу, розрахованих на різні витрати газу, а також в розробці практичних рекомендацій з проектування їх проточних частин.

Результати роботи впроваджені: в ДП НВКГ „Зоря-Машпроект” у вигляді дослідних зразків турбоімпактних сепараторів паливного газу та масловіддільників систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу, а також рекомендацій з їх проектування, 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.

Особистий внесок здобувача полягає у створенні узагальненої схеми очищення стиснутих газів шляхом комплексної турбоімпактної інтенсифікації

гідродинамічних процесів переносу полідисперсного середовища, в розробці та дослідженні схемних рішень турбоімпактних сепараторів стиснутих газів за допомогою пакетів обчислювальної гідродинаміки у двовимірній та тривимірній постановці, в адаптації фізичних і математичних моделей гідродинамічних процесів комплексного очищення стиснутих газів до умов експлуатації ГТУ, в узагальненні результатів процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпактних сепараторах, проведенні стендових випробувань та аналізі результатів експериментальних досліджень сепараторів стиснутих газів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи апробовані на: 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.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 33 наукові роботи, із них 7 статей в спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, які входять в перечень, 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.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів і висновків. У додатках наведені акти та інші матеріали, що підтверджують впровадження результатів досліджень. Загальний об'єм дисертації становить 166 сторінок, серед яких 150 сторінок основного машинописного тексту, 53 рисунка і 14 таблиць. Бібліографія містить 126 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначена актуальність теми дисертації, сформульовані мета й завдання досліджень, відображені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведені дані щодо апробації результатів дисертаційної роботи й публікацій.

Перший розділ «Проблеми очистки стиснутих газів для газотурбінних установок» присвячено проблемі очищення стиснутих газів для газотурбінних установок. Розглянуто джерела забруднення стиснутих газів ГТУ, проаналізовано основні схеми їх очищення гідродинамічними методами. Одним з напрямів підвищення ефективності використання енергоресурсів є розробка високоефективних турбоімпактних сепараторів паливного газу підвищеного тиску, що потребує вдосконалення способів інтенсифікації процесів **турбоімпактного переносу** полідисперсної фази при очищенні багатofазних сумішей паливного газу та стиснутого повітря для сучасних газотурбінних енергетичних систем.

Під **турбоімпактним** переносом розуміється перенос при обтіканні перешкод **високотурбулентними струменями** та їх системами під дією сил інерції, турбофореzu та турбулентної дифузії. Такі системи дозволяють використовувати великі швидкості потоку та відривні течії для ефективного уловлення

мікрочастинок за рахунок гідродинамічних сил (енергопотенціалу самих газових середовищ) з відводом утвореної плівки за рахунок капілярних сил та сил тяжіння.

У другому розділі «Методи досліджень процесів та інтенсифікації очищення стиснутих газів для ГТУ» розглянуто методи досліджень процесів інтенсифікації очищення стиснутих газів. Запропоновано та адаптовано узагальнену математична 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 багатофазній системі.

Загальне транспортне рівняння переносу змінної F має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(\alpha F) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta u_{xf} F) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y}(r \beta u_{yf} F) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z}(r \beta u_{zf} F) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_e^F \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(r \Gamma_e^F \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_e^F \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial z} \right) + m_{inj} F_{inj} + S_F - s_F \alpha F. \end{aligned}$$

де τ – час; α, β – коефіцієнти; x, y, z – декартові координати (для циліндричної системи координати x, r, θ відповідно); u_{xf}, u_{yf}, u_{zf} – компоненти швидкості в напрямках x, y, z ; r – радіус в циліндричній системі (для декартових координат $r=1$); Γ_e^F – тензор переносу; m_{inj} – маса рідини, що інжектуюється в одиницю об'єму за одиницю часу; F_{inj} – кількість величини F , що переноситься в інжектованій масі; S_F – джерельний член для змінної F ; s_F – член, що характеризує швидкість виведення величини F .

Для моделювання траєкторій частинок дисперсної фази додатково розв'язується рівняння балансу сил при їх русі, яке враховує інерцію частинки і основні сили, що впливають на неї:

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} = F_D + \frac{g x (\rho_k - \rho)}{\rho_k} + F_i,$$

де F_D – сила опору для одиниці маси частинки

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_k d_k^2} \frac{C_D}{24} \text{Re}.$$

Число Рейнольдса Re розраховується таким образом

$$\text{Re} = \rho d_k \frac{|u_k - u|}{\mu},$$

де u – початкова швидкість потоку; u_k – швидкість частинки; μ – молекулярна в'язкість потоку; ρ – густина потоку; ρ_k – густина частинки; d_k – діаметр частинки; F_i – додаткові сили, що впливають на частинку; C_D – коефіцієнт опору.

Для обчислень осадження частинок під дією сили інерції враховується прискорення потоку, що обтікає частинку. Сила інерції розраховується так:

$$F_i = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k).$$

Поперечний зсув частинок може бути викликано не тільки градієнтом середньої швидкості газу, але і неоднорідністю поля його пульсаційних швидкостей. Цей ефект, звичайно іменований турбулентної міграцією або турбофорезом, розраховується за формулою

$$F_2 = -0,5m_k \frac{\partial \overline{u_k'^2}}{\partial y}.$$

Додаткова сила переносу часток з'являється у разі виникнення перепаду тиску і називається диффузіофоретичною силою, яку можна розрахувати так:

$$F_3 = \left(\frac{p}{p_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x},$$

де p_w – тиск потоку біля стінки.

Наведена система рівнянь доповнена рівняннями стану та зв'язку параметрів, а також початковими і граничними умовами.

Експериментальні дослідження виконано на спеціально створених стендах у вигляді відкритих аеродинамічних труб з моделюванням середовища підвищеного тиску та в атмосферних умовах. В останньому випадку проводився перерахунок швидкостей течій в проточних частинах сепараторів відповідно до робочого тиску. В НУК за безпосередньої участі автора був розроблений і змонтований експериментальний стенд для дослідження сепараторів стиснутого газу (до 4 МПа). Загальний вигляд стенду показаний на рис. 1.

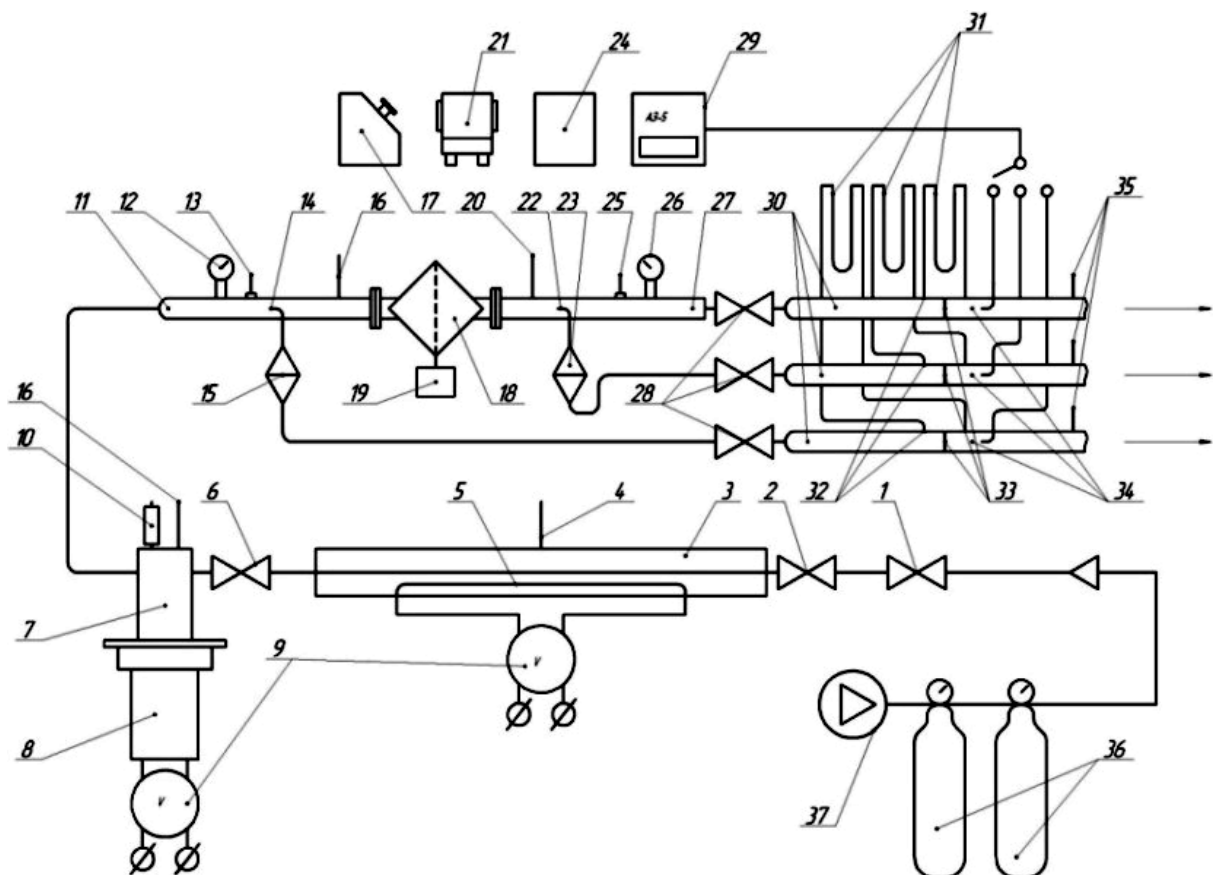


Рис. 1 - Експериментальний стенд для дослідження турбоімпактних сепараторів стиснутого газу

На рис. 1 зображені: 1, 5 – клапан; 2 – редукційний клапан; 3 – підігрівач масляний газу; 4, 16, 20, 35 – термопари; 5 – елементи підігріву; 7, 8 – генератор аерозолі; 9 – автотрансформатори; 10 – запобіжний клапан; 11 – вхідна вимірня ділянка; 12, 26 – манометри; 13, 25 – інерційні зонди; 14, 22 – пробовідбірники;

15, 23 – алонжі з фільтрами АФА; 17 – мікроскоп; 18 – сепаратор; 21 – аналітичні ваги; 24 – потенціометр; 27 – вихідна вимірна ділянка; 28 – дросельні клапани; 29 – лічильник часток АЗ; 30 – витратомірні ділянки; 31 – манометри; 32 – трубки відбору статичного тиску; 33 – дросельні шайби; 36 – балони; 37 – компресор.

Стенд забезпечує отримання модельного двофазного середовища наступних параметрів: витрата суміші 5-20 г/с при тиску 2-4 МПа; температура суміші 20-100 °С; концентрація масла в повітрі до 20 г/м³; дисперсний склад крапель 0,1-100 мкм.

Третій розділ «Теоретичні дослідження гідродинамічних характеристик турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів для ГТУ» присвячено розробці схемних рішень турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів і теоретичним двовимірним дослідженням їх гідродинамічних характеристик. Розроблено узагальнену багатоступінчасту схему комплексної турбоімпульсної інтенсифікації очищення стиснутих газів (рис. 2) за рахунок: а) підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu, дифузіофореzu і в відривних зонах; б) утворення плівки рідини з вловлених крапель з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння; в) осадження на сіткових гофрованих коагуляторах за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu та капілярних сил; г) уловлення скоагульованих крапель, що виносяться потоком, за рахунок сил тяжіння та інерції на другому ступені очистки, де протікає відвід вловленої рідини у вигляді плівки через спеціальні канавки, які розташовані на перегородці.

Відмітимо, що технологічна послідовність стадій очистки може змінюватись відповідно до конструктивного виконання сепараторів газу.

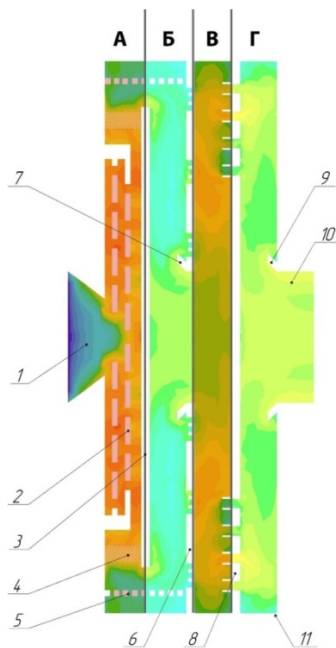


Рис. 2 - Схема узагальненої схеми турбоімпульсної інтенсифікації очищення стиснутих газів:

А – перший ступінь очистки; 1 – сопло (конфузор); 2 – перфоровані поверхні осадження із системи сопел; 3 – пластина осадження; 4 – сітковий коагулятор; 5 – перфоровані бокові поверхні; Б – другий ступінь очистки; 6 – перегородка з канавками для відводу рідини; 7 – конус; В – третій ступінь очистки; 8 – поверхня осадження з циліндричними соплами; Г – четвертий ступінь очистки; 9 – конус; 10 – патрубок відводу стиснутого газу; 11 – корпус

На основі запропонованої узагальненої схеми комплексної турбоімпульсної інтенсифікації очищення стиснутих газів для ГТУ з використанням адаптованої математичної моделі проведено теоретичні дослідження трьох конструктивних схем турбоімпульсного сепаратора в діапазоні витрат робочого середовища 500-

2200 кг/год. Перша конструктивна схема - з центральним струменем та багатоструминними системами перед коагулятором. Передбачено три турбоімпактні системи осадження часток. Другу конструктивну схему виконано з центральним струменем, вона має у вхідному патрубку конфузор, напроти якого розташовано глуху пластину, яка утворює поверхню осадження. Третя конструктивна схема містить вхідний патрубок з центральним струменем та сопловим відводом газу. Вхідна частина сепаратора має спеціальний конфузор, напроти якого розташовано глуху пластину, яка утворює поверхню осадження.

Досліджено гідродинамічні особливості цих трьох конструктивних схем турбоімпактних сепараторів стиснутих газів, які відрізняються відстанню між поверхнями осадження та розмірами секцій очищення: відповідно 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра вхідного конфузору (10, 20 та 40 мм).

З метою теоретичних досліджень процесів осадження полідисперсних частинок в елементах проточних частин сепараторів стиснутого газу побудовано двовимірні різницеві сітки в декартовій системі координат. Розміри сіток варіювалися відповідно до геометрії об'єкта, що моделюється. Сформовано необхідні початкові та граничні умови.

Виконано теоретичні дослідження основних гідродинамічних характеристик робочого середовища в турбоімпактічному струминному ступені очистки та в гофрованому сепараційному елементі: розподілу швидкості та кінетичної енергії турбулентності у робочих ділянках.

Встановлено, що в окремих ділянках сепаратора швидкість потоку збільшується у 2–2,5 рази, що дозволяє інтенсифікувати осадження частинок за рахунок турбофоретичних ефектів. Із збільшенням витрат робочого середовища для всіх конструктивних схем спостерігається зростання турбулізації потоку та збільшення розмірів зон зворотних вихорів та течій, що позитивно впливає на процеси осадження полідисперсних частинок. В першому ступені відбувається збільшення швидкості потоку через звужуючий канал, що позитивно впливає на подальше осадження високодисперсних частинок завдяки струминному очищенню: робоче середовище проходить через зону удару й розвороту струменя.

На рис. 3 приведено розподіл швидкостей в каналах турбоімпактного сепаратора паливного газу для другої конструктивної схеми при зміні ширини секцій l від 10 до 40 мм.

Визначено, що конструктивний варіант ступенів з шириною секції 0,5 діаметра вхідного конфузору (20 мм) є раціональним з точки зору ефективності очищення, перепаду тиску та розподілу кінетичної енергії турбулентності. В цьому випадку гофрований сепараційний модуль розташований на значний відстані від зони розвороту течії, і потік має достатньо часу для рівномірного розподілу по всьому поперечному перерізу каналу перед сітковим коагулятором.

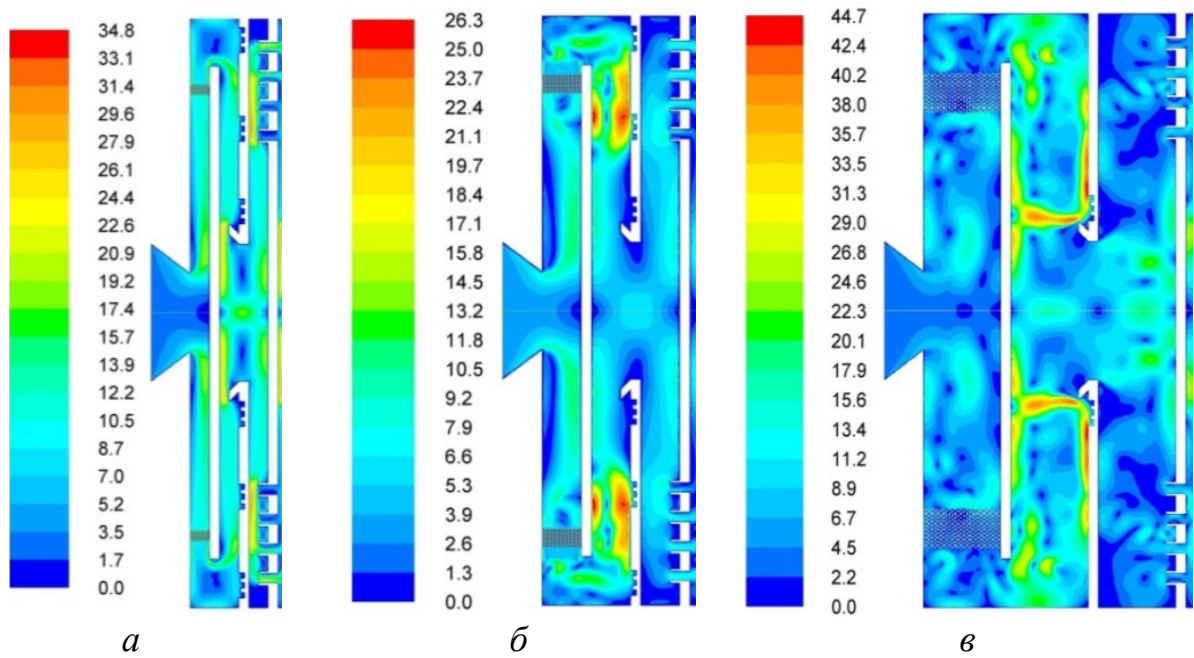


Рис. 3 - Розподіл швидкостей (м/с) в сепараторі для очистки паливного газу:
а) $l = 10$ мм; б) $l = 20$ мм; в) $l = 40$ мм

В четвертому розділі «Тривимірні дослідження гідродинамічних особливостей турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів для ГТУ» з метою детального дослідження основних гідродинамічних характеристик турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів для ГТУ, призначених для очищення робочого середовища від полідисперсної фази, розроблено тривимірні моделі турбоімпульсного струминного і гофрованого сепараційного модулів, а також сепаратора в цілому.

З використанням адаптованої математичної моделі проведені числові тривимірні дослідження основних гідродинамічних характеристик та ефективності очищення в окремих модулях та сепараторі в цілому в діапазоні витрат робочого тіла 500-2200 кг/год. Досліджені конструктивні схеми уніфікованого турбоімпульсного сепаратора паливного газу для ГТУ приведені на рис. 4, а, б, в.

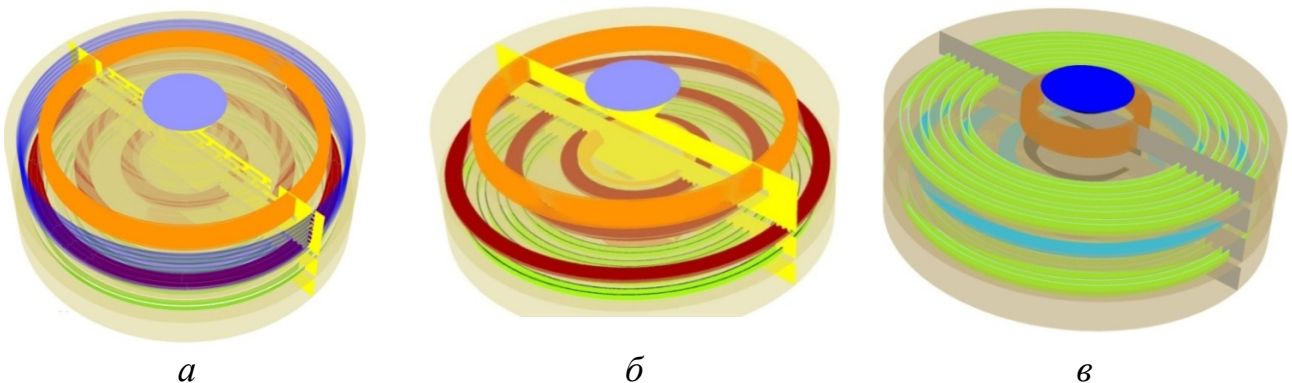


Рис. 4 - Тривимірні моделі уніфікованого сепаратора паливного газу для ГТУ:
а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3

Уніфікований сепаратор паливних газів складається з чотирьох ступенів

шириною 20 мм кожний, які утворюють дві секції, кожна з котрих з'єднана з патрубками зливу.

Результати теоретичних розрахунків показали, коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після турбоімпактного струминного модуля приймає значення від 50 до 60 % (рис. 5,а). При цьому найбільші значення цей коефіцієнт приймає для конструктивної схеми 2. Збільшення витрати робочого середовища для геометрій сепараторів конструктивних схем 2-3 приводить до підвищення значень коефіцієнта осадження часток внаслідок інтенсифікації турбулізації потоку та позитивного впливу турбофоретичного ефекту на осадження частинок.

Із збільшенням витрати робочого середовища значення коефіцієнта осадження для конструктивної схеми 1 зменшується. Це пояснюється особливістю конструкції першого ступеню сепаратора, що призводить до значних величин перепадів тисків та неможливості її застосування при великих витратах робочого середовища (1000-2200 кг/год).

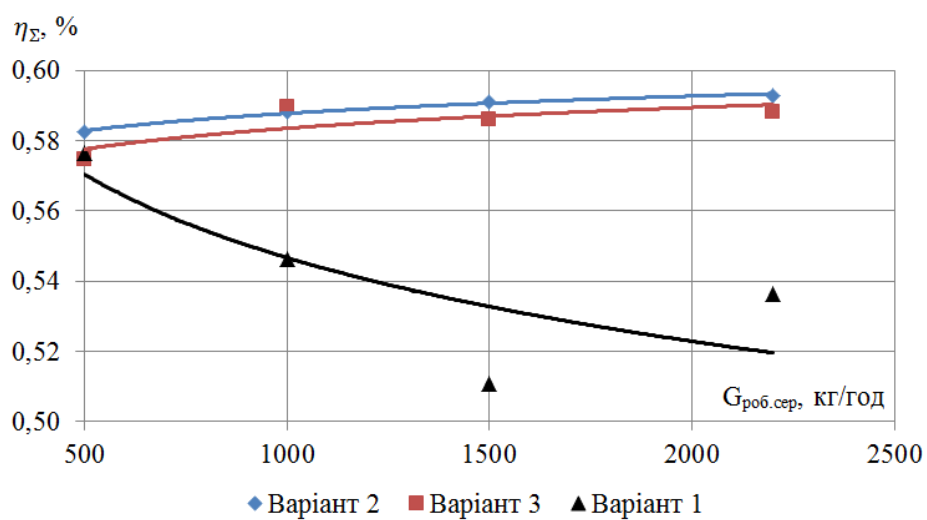
Результати тривимірних досліджень процесів осадження дисперсних частинок в гофрованому сепараційному модулі першого ступеня очистки для трьох варіантів конструктивних схем і різних витрат стиснутого газу показали (рис. 5,б), що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після гофрованого сепараційного модуля приймає значення від 70 до 80 %. При цьому найбільші значення цей коефіцієнт набуває для розрахункової геометрії схеми 2.

На рис. 5,в наведено графіки залежностей сумарного коефіцієнта осадження дисперсних частинок в уніфікованому сепараторі паливного газу від витрати робочого середовища. Сумарний коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після всіх ступенів очистки сепаратора приймає значення від 85 до 99 %.

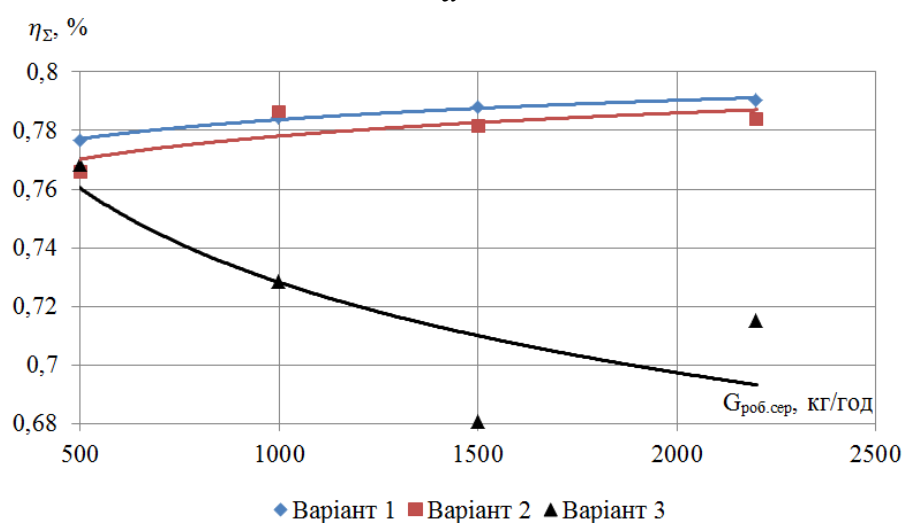
Згідно проведених тривимірних розрахунків гідродинамічної структури потоків та процесів осадження полідисперсної фази раціональною, з точки зору ефективності осадження частинок, є конструктивна схема 2, для якої значення сумарного коефіцієнта осадження полідисперсних частинок є максимальними для кожного окремого ступеня та для всієї конструкції в цілому.

П'ятий розділ «Експериментальні дослідження ефективності турбоімпактних сепараторів стиснутих газів. Впровадження результатів роботи» присвячено експериментальним дослідженням ефективності турбоімпактних сепараторів стиснутих газів та впровадженню результатів дисертаційної роботи.

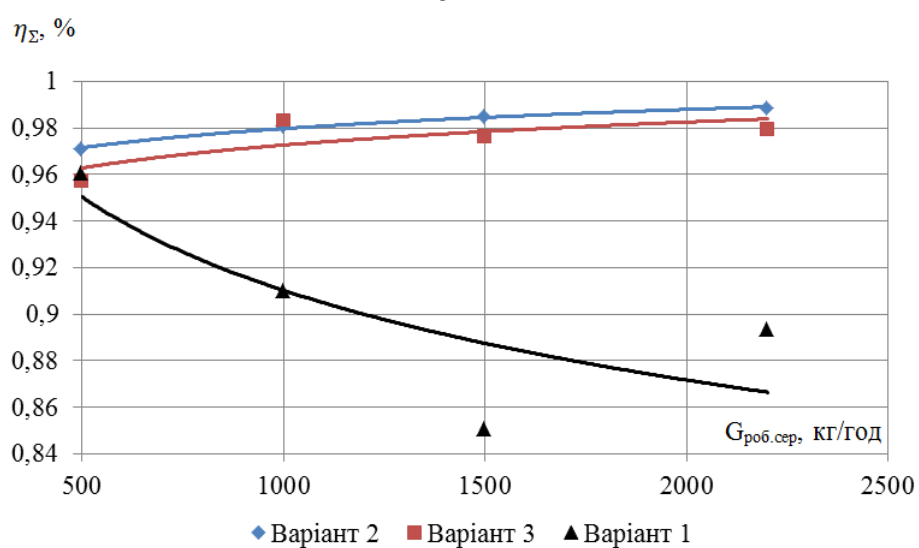
За результатами теоретичних досліджень ефективності роботи турбоімпактного сепаратора паливних газів для ГТУ розроблені інженерно-конструкторські рішення для найбільш ефективного варіанта сепаратора. На рис. 6 наведена розроблена тривимірна конструкція сепаратора паливного газу, яка була використана для побудови робочих креслень для виготовлення дослідного зразку сепаратора.



a



б



в

Рис. 5 - Залежності коефіцієнтів осадження від витрати газу:
 а – після турбоімпаکتного струминного модулю; б) – після гофрованого сепараційного модулю; в) – в уніфікованому турбоімпактівному сепараторі

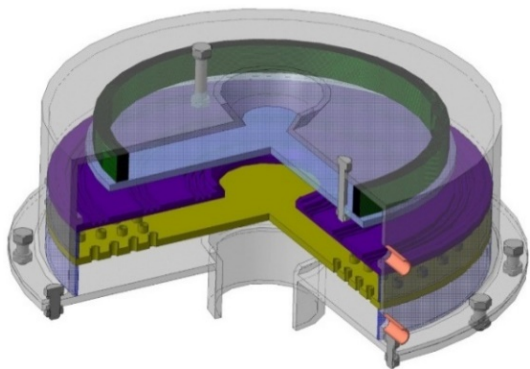


Рис. 6 - Тривимірна конструктивна схема уніфікованого сепаратора паливного газу

Розроблено та виготовлено дослідний зразок турбоімпаکتного сепаратора паливного газу ГТУ (рис. 7,а). Програма стендових сепаратора дозволяла охопити діапазон витрат повітря через нього від 30 до 150 м³/год, відповідний витратам стисненого паливного газу для робочих режимів ГТУ. Початкова концентрація високодисперсного аерозолію на вході сепаратора досягала 800 мг/м³.

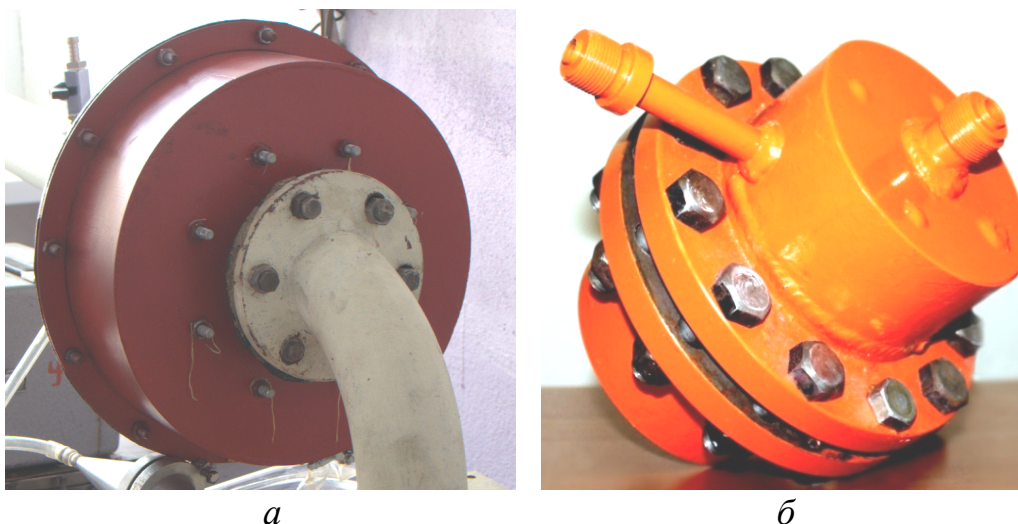


Рис. 7 - Дослідні зразки турбоімпактних пристроїв:

а) – сепаратора паливного газу; б) – масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу

Проточна частина сепаратора паливного газу містила турбоімпактні і коагулюючі модулі, які досліджувалися з метою отримання раціональних геометричних параметрів. Це досягалося шляхом збільшення числа шарів сіток в коагуляторі, варіюванням діаметрами дротів сіток та ін.

Проведений аналіз експериментальних даних показав, що ефективність очищення від аерозолів в турбоімпакті сепараторі без коагулятора в усьому дослідженому діапазоні витрат газу складає від 82 до 88 %, а з використанням гофрованого коагулятора – від 98 до 99,5 % при аеродинамічному опорі від 0,7 до 3,2 кПа. Ці дані підтверджують результати тривимірних теоретичних розрахунків.

На рис. 8 приведено порівняльні діаграми сумарних коефіцієнтів ефективності очищення η_{Σ} , які отримані теоретичним шляхом застосуванням

універсальної математичної моделі процесів турбоімпактного переносу та при виконанні експериментальних досліджень (режими 1-10) на розроблених стендах. Представлені результати свідчать про задовільну кореляцію експериментальних і теоретичних результатів і можливість використання узагальненої математичної моделі турбоімпактного переносу для оптимізації параметрів пристроїв очистки стиснутих газів для ГТУ.

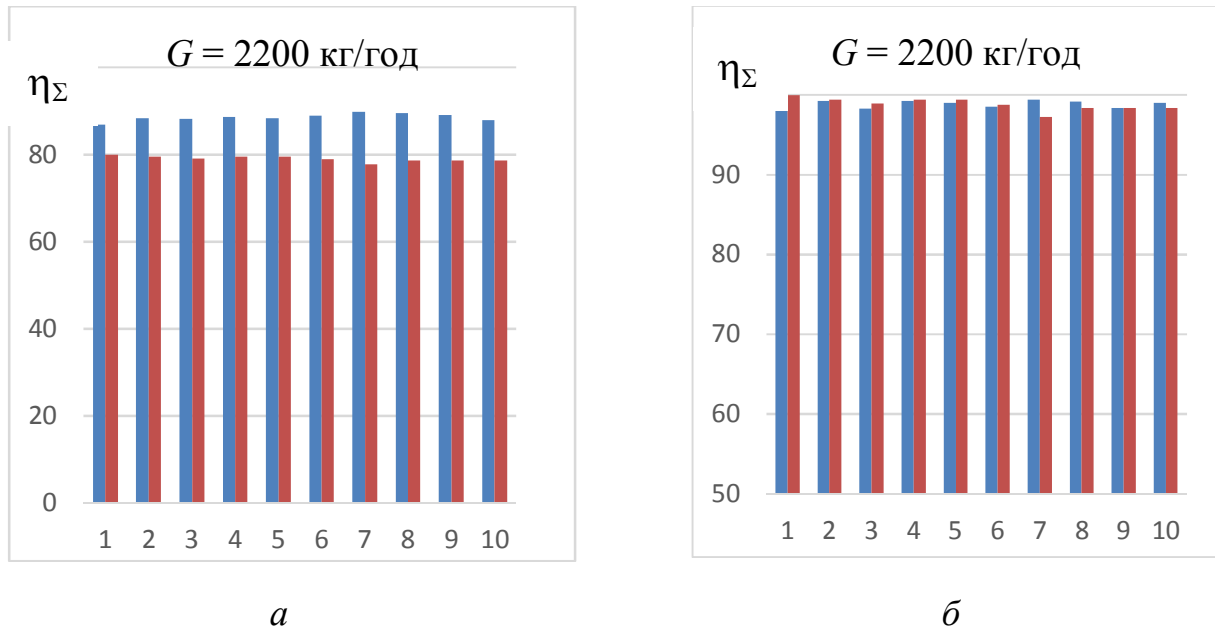


Рис. 8 - Порівняння експериментальних і розрахункових значень коефіцієнта ефективності очищення сепаратора без гофрованого коагулятора (а) та з гофрованим коагулятором (б):

■ – експеримент; ■ – розрахунок

На основі конструктивної схеми уніфікованого сепаратора стиснутого газу розроблено та досліджено турбоімпактний масловіддільник системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу, загальний вигляд дослідного зразку якого наведено на рис. 7,б, а конструктивна схема – на рис. 9.

Робота турбоімпактного масловіддільника здійснюється таким чином. Стиснутий газ, що очищується, надходить в патрубок підведення газу 4, а звідти – в сопло 3. В системі «сопло 3 - пластина 6 - коагулятор 5» здійснюється перший ступінь очистки газу від крапель рідини. Потім потік прямує до проміжного коагулятора 7. Це створює умови для послідовного фракційного очищення стиснутого газу від найдрібніших крапель і подальшого ефективного очищення в другому ступені. Укрупнені в коагуляторі 7 краплі потоком виносяться в сопло 2, яке разом з пластиною 9 і коагулятором 10 утворюють останній зачисний ступінь очистки. Очищений газ прямує у вихідний патрубок 11, а уловлене масло віддаляється з корпусу через патрубки зливу 13 і 14.

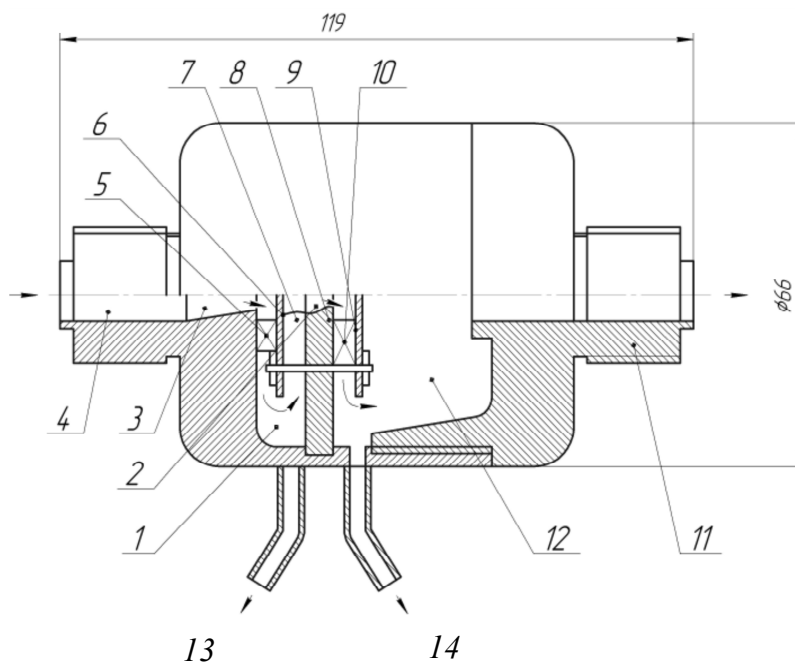


Рис. 9 - Конструктивна схема турбоімпактного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу:

1 – вхідний ступінь; 2,3 – сопла; 4 – вхідний патрубок; 5 – коагулятор;
6 – пластина; 7 – проміжний коагулятор; 8 – перегородка; 9 – пластина;
10 – зачисний коагулятор; 11 – вихідний патрубок; 12 – вихідний ступінь;
13,14 – зливні патрубки

Проведені експериментальні дослідження показали, що в дослідженому діапазоні початкових концентрацій забруднювача (від 20 до 40 г/м³), тисків газу (від 3 до 4 МПа) при витраті стиснутого повітря 10 г/с коефіцієнт ефективності очищення турбоімпактного масловіддільника становить: для першого ступеня 92,0-98,6 %, а для двох ступенів 99,7-99,9 % при перепаді тиску біля 0,06 МПа. Вихідна концентрація масляного аерозолі в середньому становить 40-50 мг/м³, що повністю задовольняє сучасним вимогам до систем суфлювання ГТУ.

На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено практичні рекомендації з проектування проточних частин турбоімпактних сепараторів стиснутих газів ГТУ.

Виконано впровадження турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ в ДП “Науково-виробничий комплекс газотурбобудування” “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 “Аksamит”). На основі конструкції його елементів отримано деклараційний патент на корисну модель 102840 U “Пристрій для відокремлення рідини від газу”.

Робочі креслення турбоімпактного сепаратора паливних газів передано НВКГ “Зоря”-“Машпроект” в рамках виконання госпрозрахункової теми № 1875 «Розробка сепаратора для первинного очищення паливних газів від твердої та рідкої фракцій», номер держреєстрації № 0111U009084.

Результати роботи також використано в Міністерстві освіти і науки України при виконанні держбюджетної теми № 1894 «Основи турбоімпаکتної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищеного тиску для енергетичних установок», номер держреєстрації № 0113U000241, а також в навчальному процесі НУК при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальностями: «Турбіни», «Газотурбінні установки і компресорні станції» та «Екологія та охорона навколишнього середовища».

Виконано розрахунок економічного ефекту від впровадження турбоімпактних сепараторів паливних газів в системі паливопідготовки трьох ГТД ДН-80 з витратою газу 6500 кг/год, який показав, що за шість років експлуатації на компресорній станції ПАТ «Укртрансгаз» він складе біля 150 тис. доларів США.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено розв'язання науково-прикладної задачі створення високоефективного турбоімпактного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок на основі запропонованих схемних рішень та методів інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу. На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу та узагальнення вітчизняних і закордонних літературних даних сформульовано основні напрямки вдосконалення гідродинамічних характеристик та створення високоефективних сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок на основі інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу полідисперсного середовища.

2. Адаптовано узагальнену математичну модель сепаратора стиснутих газів для ГТУ з урахуванням двофазності процесів, що дозволяє розв'язувати задачі підвищення ефективності уловлення аерозолів в турбоімпактних системах, та проведено її верифікацію.

3. Розроблено та створено експериментальні стенди для дослідження робочих процесів турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ у вигляді відкритих аеродинамічних труб з використанням моделювання параметрів середовища підвищеного тиску.

4. Розроблено узагальнену багатосекційну схему комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів за рахунок: а) підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu, дифузіїфореzu й у відривних зонах; б) утворення плівки рідини з вловлених крапель з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння; в) висадження на сіткових гофрованих коагуляторах за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu та капілярних сил; г) уловлення зкоагульованих крапель, що виносяться потоком, за рахунок сил тяжіння та інерції. Технологічна послідовність стадій очищення може змінюватись відповідно до схемних рішень і призначення сепараторів газу.

5. Розроблено і досліджено три схемні рішення новітніх 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.

6. Виконано теоретичні дослідження основних гідродинамічних характеристик робочого середовища в турбоімпульсному струминному ступені очищення та в гофрованому сепараційному елементі: розподілу швидкості та кінетичної енергії турбулентності у робочих ділянках в діапазоні витрат робочого середовища 500–2200 кг/год. Встановлено, що в окремих ділянках сепаратора швидкість потоку збільшується у 2–2,5 рази, що дозволяє інтенсифікувати осадження частинок за рахунок турбофоретичних ефектів. Визначено, що конструктивний варіант ступенів з розміром секції 0,5 діаметра вхідного конфузору (20 мм) є раціональним з точки зору ефективності очищення, перепаду тиску та розподілу кінетичної енергії турбулентності.

7. Виконано розрахунки процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпульсному струминному модулі сепараторів очищення паливного газу для ГТУ. Встановлено, що розрахунковий коефіцієнт осадження полідисперсної фракції в цьому модулі приймає значення від 50 до 60 %. Виконані тривимірні розрахунки процесів очищення стиснутого паливного газу в гофрованому сепараційному модулі дозволили встановити, що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після цього модулю дорівнює 70-80 %.

8. Розроблено схемне рішення уніфікованого сепаратора паливного газу ГТУ з максимальною ефективністю очищення. Виконано його теоретичні дослідження, які показали, що сумарний коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після всіх ступенів очищення приймає значення від 85 до 99 %. Доведено можливість застосування уніфікованого сепаратора в широкому діапазоні витрат робочого тіла із збереженням невисоких значень перепадів тисків.

9. На основі виконаних теоретичних досліджень розроблено конструкцію сепаратору паливного газу ГТУ та його робочі креслення, виготовлено дослідний зразок. Сепаратор спроектовано на наступні натурні параметри паливного газу: витрата 500-2200 кг/год при тиску 1,6-3,6 МПа.

10. Проведено експериментальні випробування турбоімпульсного сепаратора для ГТУ в стендових умовах, які показали, що ефективність очищення від аерозолів у турбоімпульсному сепараторі без коагулятора в усьому дослідженому діапазоні витрат газу складає від 82 до 88 %, а з використанням гофрованого коагулятора – від 98 до 99,5 % при аеродинамічному опорі від 0,7 до 3,2 кПа.

11. Розроблено конструкцію та виготовлено дослідний зразок турбоімпульсного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу. Його експериментальні дослідження показали, що в дослідженому діапазоні початкових концентрацій забруднювача (від 20 до 40 г/м³), тисків газу (від 3 до 4 МПа) при витраті стиснутого повітря 10 г/с сумарний коефіцієнт ефективності очищення турбоімпульсного масловіддільника становить: для першого ступеня 92,0-98,6 %, а для двох ступенів 99,7-99,9 % при перепаді тиску біля 0,06 МПа.

12. Розроблено практичні рекомендації з проектування проточної частини турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів ГТУ з використанням отриманих теоретичних і експериментальних даних.

13. На основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів для

ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” розроблено робочі креслення і виготовлено дослідні зразки турбоімпаکتного сепаратора паливних газів для ГТУ та турбоімпаکتного масловіддільника для очищення газу систем суфлювання перспективних ГТУ замкнутого циклу, захищеного деклараційним патентом 102840 У. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі НУК при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальностями: «Турбіни», «Газотурбінні установки і компресорні станції» та «Екологія та охорона навколишнього середовища».

14. Розрахунок економічного ефекту від впровадження турбоімпактних сепараторів паливних газів в системі паливопідготовки трьох ГТД ДН-80 з витратою газу 6500 кг/год показав, що за шість років експлуатації на компресорній станції ПАТ «Укртрансгаз» він складе біля 150 тис. доларів США.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації опубліковано **в наукових спеціалізованих виданнях:**

1. Рижков О.С. Оцінка ефективності циклона батареїного типу за коефіцієнтом гідродинамічної ефективності [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков, Ю.В. Качанова // Збірник наукових праць НУК. – 2013. – Вип. 2. – С. 106-109.

2. Рижков Р.С. Вдосконалення масловологовіддільників енергосистем стисненого повітря на основі гідродинамічних розрахунків [Електронний ресурс] / Р.С. Рижков, О.С. Рижков // Вісник НУК. – 2013. – Вип. 2. – Режим доступу: <http://evn.uos.edu.ua>.

3. Рижков С.С. Результати дослідження впливу підвищення тиску на ефективність турбоімпактних сепараторів багатофазних сумішей палив [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Збірник наукових праць НУК. – 2013. – Вип. 4. – С. 56-61.

4. Рижков О.С. Розрахунок ефективності трьох ступенів пристрою масловідділення [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков, А.В. Попова // Збірник наукових праць НУК. - 2014. – Вип. 5. – С. 38-44.

5. Басок Б.І. Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / Б.І. Басок, С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // «Промышленная теплотехника», международный научно-прикладной журнал. – 2014. – №1. – С. 20–26.

6. Рижков Р.С. Експериментальні дослідження ефективності турбоімпаکتного сепаратора паливного газу для ГТУ [Текст] / Р.С. Рижков, С.І. Сербін // Збірник наукових праць НУК. – 2015. – Вип. 2. – С. 76-82.

7. Ryzhkov R.S. Experimental Investigations of Efficiency of the Turboimpact Breathing Systems Separator for Gas Turbine Installation of Closed Cycle [Text] / R.S. Ryzhkov, S.I. Serbin // Shipbuilding & Marine Infrastructure. – 2015. – No. 2.

8. Декл. пат. на кор. мод. України 102840. Пристрій для відокремлення рідини від газу; F01M 13/04 (2006.01) / С.С. Рижков, Р.С. Рижков. – № u 2015 04079 ;

Заявл. 27.04.2015 ; Опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22. – 3 с. : іл.

Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

9. Рижков О.С. Стенд для исследований сепарационного оборудования [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2010. – С. 324-326.

10. Рижков О.С. Экспериментальный стенд для исследования изотермических маслоотделителей [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2010. – С. 317-318.

11. Рижков О.С. Принципиальная схема стенда для исследований газоочистителей [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2011. – 2 с.

12. Рижков С.С. Струйные масловлагоотделители для очищения сжатого воздуха [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали 6-ї міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2011. – 2 с.

13. Рижков С.С. Моделирование нестационарных процессов в коагуляторе маслоотделителя [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, Н.А. Гончарова // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали 6-ї міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2011. – 1 с.

14. Рижков О.С. Исследование газоочистных устройств [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2011. – С.460-463.

15. Рижков О.С. Масловлагоотделители для очищения сжатого воздуха [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2011. – С.466-467.

16. Рижков О.С. Стенд для исследований газоочистителей [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв. – С. 474-476.

17. Рижков Р.С. Вдосконалення конструкцій струминних масловологовіддільників для енергосистем стисненого повітря на основі розрахунків гідродинаміки проточної частини [Текст] / Р.С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2012– С.116-119.

18. Рижков О.С. Використання розрахунку коефіцієнту гідродинамічної ефективності для вдосконалення батарейних циклонів [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков, Ю.В. Качанова // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.125-129.

19. Рижков С.С. Турбоімпактний перенос частинок багатofазних сумішей

палив підвищеного тиску у межах внутрішньої задачі [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.115-116.

20. Рижков О.С. Моделювання потоку газу в апаратах мокрого типу пиловловлювання [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков, Ю.В. Качанова // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.72-75.

21. Рижков С.С. Дослідження газодинаміки 3D моделі турбоімпаکتного сепаратора з радіальним коагуляційним елементом палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.129-132.

22. Рижков С.С. Осадження рідкої фази у турбоімпактних сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.132-133.

23. Рижков С.С. Дослідження турбоімпаکتного осадження частинок багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.134-135.

24. Радченко А.М. Енергоресурсозберігаючі технології для стаціонарної та суднової енергетики [Текст] / А.М. Радченко, Д.В. Коновалов, Р.С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.224-230.

25. Рижков С.С. Інтенсифікація осадження частинок у полідисперсному середовищі для дослідного обладнання з отримання синтез газу за технологією екопірогенезіс [Текст] / С.С. Рижков, О.С. Борцов, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV міжнародна науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 354-355.

26. Рижков С.С. Дослідження коефіцієнту осадження турбоімпаکتного сепаратора багатофазних сумішей палив підвищеного тиску при різних витратах робочого середовища [Текст] / С.С. Рижков, О.С. Борцов, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV міжнародна науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.364-365.

27. Рижков С.С. Математична модель турбоімпаکتного переносу частинок при очищенні синтез-газу технології екопірогенезіс [Текст] / С.С. Рижков, О.С. Борцов, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV міжнародна науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 375-377.

28. Рижков С.С. Розробка маслоровологовіддільників енергосистем стисненого повітря на основі гідродинамічних розрахунків [Текст] / С.С. Рижков, О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Проблеми екології та

енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. – С.92-93.

29. Рижков С.С. Дослідження газодинамічних турбоімпактних сепараторів на основі програмного пакету ANSYS [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. – С.37-39.

30. Рижков С.С. Дослідження турбоімпактного сепаратора багатofазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. – С.39-41.

31. Рижков С.С. Дослідження гідродинаміки сепаратора підвищеного тиску у межах внутрішньої задачі сучасними програмними пакетами ANSYS [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. – С.41-42.

32. Рижков С.С. Розрахунок осадження рідкої фази у сепараторах багатofазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. – С.93-94.

На основі результатів досліджень дисертаційної роботи отримано премію Верховної Ради України:

33. Тригенераційні технології для стаціонарної та судової енергетики : наукова робота / А.М. Радченко, Р.М. Радченко, Д.Б. Коновалов, Р.С. Рижков // Премія Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок за 2012 рік.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:

[1] – результати досліджень коефіцієнта гідродинамічної ефективності сепаратора; [2] – розробка експериментального стенда для дослідження масловіддільників; [3] – результати дослідження турбоімпактних сепараторів, що працюють на стиснутих газах; [4] – розробка математичної моделі процесів осадження та дані з ефективності триступінчастого сепаратора; [5] – технологічні схеми з інтенсифікації процесів осадження рідкої фази, розробка конструктивних модифікацій пристроїв очистки; [6] – результати експериментальних досліджень турбоімпактового сепаратора для ГТУ; [7] – результати експериментальних досліджень ефективності сепаратора системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу; [8] – конструктивні особливості пристрою для відокремлення рідини; [9, 10, 11, 16] – розробка елементів експериментальних стендів для дослідження газоочисних пристроїв; [12, 17] – розробка конструктивних схем пристроїв для очистки стиснутого газу; [13] – розробка математичних моделей для розрахунків нестационарних процесів; [14, 15] – аналіз характеристик газоочисних пристроїв;

[18-21] – аналіз теоретичних даних ефективності турбоімпактних сепараторів стиснутого газу; [22, 23] – результати досліджень очисних пристроїв підвищеного тиску; [24-27] – аналіз ефективності турбоімпактної технології очистки газів, розробка рекомендацій з підвищення їх ефективності; [28-30] – розробка елементів турбоімпактних сепараторів на основі гідродинамічних розрахунків; [31-32] – аналіз характеристик процесів осадження; [33] – рекомендації з використання систем турбоімпактної очистки газів для суднової та стаціонарної енергетики.

АНОТАЦІЯ

Рижков Р.С. Створення високоефективного турбоімпактного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет “Одеська морська академія”, МОН України, Одеса, 2016.

Дисертація присвячена створенню високоефективного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок. Розроблено узагальнену багатоступінчасту схему комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів за рахунок підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу, дифузіофорезу і в відривних зонах. Виконано теоретичні та експериментальні дослідження ефективності процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпактічному струминному сепараторі очищення стиснутих газів ГТУ.

Розроблено конструктивні схеми та виготовлено дослідні зразки турбоімпактного сепаратора паливного газу та масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу. Розроблено практичні рекомендації з проектування проточної частини турбоімпактних сепараторів стиснутих газів.

Ключові слова: газотурбінна установка, сепаратор, турбоімпактна технологія, паливна система, система суфлювання, математична модель.

АННОТАЦИЯ

Рыжков Р.С. Создание высокоэффективного турбоимпактного сепаратора сжатых газов для газотурбинных установок.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный университет “Одесская морская академия”, МОН Украины, Одесса, 2016.

Диссертация посвящена созданию высокоэффективного сепаратора сжатых газов для газотурбинных установок. Разработана обобщенная многоступенчатая схема комплексной турбоимпактной интенсификации очистки сжатых газов за счет увеличения скорости и уровня турбулентности струй под действием сил инерции, турбулентной диффузии, турбофореза, диффузиофореза и в отрывных зонах.

Адаптирована обобщенная математическая модель сепаратора сжатых газов

для ГТУ с учетом процессов двухфазности, что позволяет решать задачи повышения эффективности улавливания аэрозолей в турбоимпактных системах, а также проведена ее верификация. Разработаны и созданы экспериментальные стенды для исследования процессов в турбоимпактных сепараторах сжатых газов для ГТУ в виде открытых аэродинамических труб с использованием моделирования параметров среды повышенного давления.

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования эффективности процессов осаждения полидисперсных частиц в турбоимпактном сепараторе очистки сжатых газов ГТУ. Разработаны конструктивные схемы и изготовлены опытные образцы турбоимпактного сепаратора топливного газа и маслоотделителя системы суфлирования ГТУ замкнутого цикла.

Экспериментальные исследования показали, что эффективность очистки от аэрозолей в турбоимпактном сепараторе топливных газов без коагулятора составляет 82-88 %, а с использованием гофрированного коагулятора 98-99,5 %. Суммарный коэффициент очистки опытного образца турбоимпактного маслоотделителя составляет 99,7-99,9 % при перепаде давления около 0,06 МПа. Разработаны практические рекомендации по проектированию проточной части турбоимпактных сепараторов сжатых газов.

Ключевые слова: газотурбинная установка, сепаратор, турбоимпактная технология, топливная система, система суфлирования, математическая модель.

SUMMARY

Ryzhkov R.S. Creation of high-effective turboimpact compressed gases separator for gas turbine installations.

The thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences on specialty 05.05.03 – Engines and Power Plants. – National University “Odessa Maritime Academy”, Ministry of Science and Education of Ukraine, Odessa, 2016.

The thesis is devoted to creation of high-effective turboimpact compressed gases separator for gas turbine installations.. The generalized multistage scheme of complex turboimpact intensification of compressed gases clearing at the expense of velocity and level of streams turbulence increase under the influence of an inertial force, a turbulent diffusion, turbophoresis, turbophores, diffusiphoresis and in vortex zones is developed. Theoretical and experimental investigations of efficiency of polydisperse particles deposition processes in the turboimpact separator for compressed gases clearing for gas turbine installations have been conducted.

Constructive separator's designs are developed and prototypes of turboimpact fuel gas separator and oil separator for breathing system of gas turbine installations of closed cycle are produced. Practical recommendations concerning designing of flowing parts of turboimpact separators of compressed gases are developed.

Key words: gas turbine installation, separator, turboimpact technology, fuel system, breathing system, mathematical model.

Підп. до друку 15.04.2016 р. Формат 60х84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,16.
Тираж 100 пр. Зам. № И16-04-60

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003