

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента Веретенніка О. М. на дисертаційну роботу Рижкова Сергія Сергійовича "Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках", подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

### 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

#### 1.1. Структура та обсяг дисертації.

Роботу виконано в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, 6 додатків. Повний обсяг дисертації 424 сторінки, у т.ч. 270 сторінок основного машинописного тексту, 120 рисунків на 108 сторінках, 56 таблиць на 43 сторінках, списку використаних джерел інформації з 179 найменувань на 21 сторінці, додатків на 68 сторінках.

**1.2. 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, текстовий матеріал викладено грамотною технічною мовою.

Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, встановленим МОН України.

Зміст автореферату ідентичний змістові дисертації і відображає основні положення роботи.

**1.3. Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження** відповідають паспорту спеціальності 05.05.03 "Двигуни та енергетичні установки" за напрямками досліджень.

У вступі обґрунтовано актуальність теми та її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету та завдання наукового дослідження, об'єкт і предмет дослідження, стисло викладено методологічні основи досліджень, визначено наукову новизну, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, відображено повноту їх викладення в публікаціях та ступінь їх апробації на конференціях.

У першому розділі розглянуті основи сепарації аерозольних середовищ в енергетичних установках; виконаний аналіз перенесення частинок у градієнтних полях тисків, пульсацій, температур, акустичних коливань та сучасних сепараційних технологій очистки аерозольних середовищ для енергетичних установок; обґрунтована мета і виконана постановка завдань дослідження.

У другому розділі обґрунтовані узагальнені багаторівневі системи й схеми градієнтних сепараційних аерозольних технологій та методи їх досліджень. Наведена узагальнена математична модель процесу сепарації аерозольних технологій. Подані методи експериментального дослідження

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"	
КАНЦЕЛЯРІЯ	
Вхідний №	584
Надійшло	24.05.2018
	1

процесів сепарації аерозольних середовищ, опис і схеми експериментальних стендів для дослідження потоку методом голографічної інтерферометрії, дослідження сепараторів аерозолів з підвищеною концентрацією рідкої фази, досліджень очистки високодисперсних аерозольних середовищ. Наведені методика проведення вимірювань та оцінка похибки вимірювань. Наприкінці розділу викладено методи узагальнення результатів дослідження градієнтних процесів перенесення при очищенні аерозольних середовищ.

У **третьому розділі** отримані результати дослідження інерційного і турбофоретичного рівнів градієнтних аерозольних технологій. Для цього за допомогою візуалізації процесів обтікання струминним потоком поверхонь голографічної інтерферометрії в реальному часі досліджено обтікання поверхонь струменями та багатофункціональних поверхонь осадження.

У **четвертому розділі** встановлені особливості спільного неізотермічного та акустикофоретичного рівнів градієнтних аерозольних технологій; отримані результати дослідження сепараційних характеристик акустикофоретичної та акустиконеізотермічної технології в багатофункціональних поверхнях каналів.

У **п'ятому розділі** шляхом 3D-моделювання проведено дослідження сепараторів на основі багаторівневих градієнтних аерозольних технологій та упродовження результатів роботи в енергетичних установках. На підставі результатів моделювання розроблено конструктивні схеми та рекомендації з побудови пристроїв очищення дисперсних середовищ для екологічних і економічних енергетичних установок: сепараторів для пневмосистем і картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, односекційного та багатосекційного неізотермічного сепараторів для енергетичних установок, багатоступінчатих плоских акустикофоретичних сепараторів, акустикофоретичного модуля сепаратора та ін.

## **2. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ**

Актуальність проблеми очищення робочого тіла теплових двигунів, основу якого становить навколишнє повітря, від різноманітних дисперсних включень рідкої і твердої фаз, а також продуктів згоряння рідких і газоподібних палив обумовлена їх впливом на техніко-економічні й екологічні показники двигунів та енергетичних установок. В енергетичних установках цей вплив характеризується залежністю інтенсивності теплопередачі в елементах газоповітряного тракту від стану їх забрудненості, якісного та кількісного складу шкідливих викидів у відпрацьованих газах, необоротних втрат мастил, води тощо. То ж якісне очищення газів дозволяє не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища відпрацьованим робочим тілом енергетичних установок, а й підвищити ресурс їх елементів, знизити споживання палива утилізацією низькопотенційної енергії газопарових викидів, скоротити втрати цінних матеріалів.

Сучасні сепараційні технології здатні очищувати газові та рідкі середовища від частинок розміром більше 10 мкм з ефективністю не менше

0,99. Їх очищення від частинок менше 10 мкм менш ефективно і потребує розробки газоочисного сепараційного обладнання, здатного уловлювати частинки таких розмірів і застосовувати ресурсозберігаючі можливості самих установок за рахунок використання енергії самого робочого тіла.

**Науково-прикладною проблемою**, що вирішується в дисертаційній роботі, є створення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементація в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок.

### **3. МЕТОДОЛОГІЯ ТА ФІЗИЧНА ОСНОВА ДОСЛІДЖЕНЬ.**

Вдосконалення технологій інтенсифікації процесів сепарації в аерозольних дисперсних середовищах для розробки широкого діапазону сепаруючого обладнання забезпечене теоретико-експериментальним розв'язанням дослідницьких завдань на єдиній методологічній основі. Розв'язання рівнянь математичних моделей турбулентного перенесення в технологіях інтенсифікації осадження здійснене за допомогою методу контрольованого об'єму з використанням сучасного комплексу обчислювальної гідродинаміки. Експериментальні дослідження сепараторів для енергетичних систем проведено на спеціально створених стендах у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу із застосуванням лічильників частинок і фотометрів аерозолів; розрахунок концентрації дисперсної фази здійснено ваговим методом за допомогою аналітичних фільтрів. При постановці дослідів використовувалася загальна теорія моделювання та планування експериментів, а при обробці даних і перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

### **4. ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ РОБОТИ**

Достовірність наукових положень і теоретичних результатів підтверджується їх задовільним узгодженням з експериментальними даними, результатами їх впровадження в практику проектування та експлуатації ряду провідних організацій – проектантів і виробників енергетичного обладнання, двигунів та енергетичних установок. Прийняті припущення та обмеження достатньо обґрунтовані, а їх коректність підтверджена на практиці.

### **5. НОВИЗНА НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ**

**5.1. Нові наукові результати**, отримані автором, полягають у тому, що:

1. Уперше методами фізичного та математичного моделювання термоаеродинамічних і акустичних процесів багатофазних середовищ обґрунтовано підвищення інтенсивності очищення робочого тіла градієнтними сепараційними аерозольними технологіями та, як наслідок, поліпшення техніко-економічних показників двигунів та енергетичних установок за рахунок зменшення термічного й аеродинамічного опору на поверхнях елементів їх проточних частин при осадженні аерозолі, а також скорочення викидів пари і мастила в навколишнє середовище.



2. Уперше обґрунтовано й реалізовано принцип багаторівневої сепарації частинок твердого і рідинного аерозолів робочих тіл двигунів та енергетичних установок з розміром частинок 1...10 мкм комбінованим застосуванням різних градієнтних способів сепарації з послідовним або сумісним їх використанням залежно від складу робочого тіла й відповідного енергетичного обладнання.

3. Уперше розроблено і реалізовано в багаторівневих технологіях очищення робочих тіл двигунів та енергетичних установок способи раціональної організації процесів з різними механізмами сепарації аерозольних середовищ, а також визначено параметри та умови ефективного застосування способів, зокрема швидкість і дисперсність дво- та багатофазних потоків робочих тіл, форма, розміри й орієнтація поверхонь осадження, потенціали термоаеродинамічних і акустичних полів, розходження потоку тощо, умови формування ділянок осадження, за яких відбувається укрупнення частинок уловленої рідкої фази та її відведення без вторинного винесення в потік та які забезпечують збільшення коефіцієнта уловлювання з 50 до 80 % за рахунок інтенсифікації процесів сепарації шляхом використання різних технологій: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної.

4. Отримав подальший розвиток метод 3D-проекування та дослідження систем і агрегатів двигунів та енергетичних установок: пневмосистем і систем картерних газів двигунів внутрішнього згорання, одно- та багатосекційних неізотермічних сепараторів газопаротурбінних установок, акустикофоретичних сепараторів і масловіддільників систем суфлювання газотурбінних двигунів, стиснутих газів енергосистем, суднових систем очищення повітря від краплинної вологи, які використовують технології інерційної і градієнтної турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної сепарації.

На основі отриманих наукових результатів сформульовано **наукові положення:**

– створення інноваційних енергетичних установок для суден, газоперекачувальних і теплоелектричних станцій з поліпшеними техніко-економічними, екологічними та експлуатаційними показниками в широкому діапазоні зміни навантаження можливе шляхом імплементації сепараційного обладнання, в якому використовуються багаторівневі градієнтні сепараційні аерозольні технології, що завдяки комбінації різних способів як сукупності процесів та умов сепарації забезпечують гнучку адаптацію до режимів експлуатації, робочих тіл і відповідного енергетичного обладнання;

– підвищення ефективності очищення робочих тіл енергетичних установок і фракційних та інтегральних показників їх сепараційного обладнання досягається багаторівневим очищенням аерозольних середовищ шляхом комбінації різних рівнів градієнтних сепараційних технологій з послідовним або сумісним використанням енергетичного потенціалу самих потоків робочого тіла (інерційна, турбо- й дифузіофоретична сепарація) та зовнішніх джерел (неізотермічно- та акустикофоретична сепарація);

– необхідний рівень ефективності очищення робочих тіл енергетичних

установок залежно від режимів їх експлуатації, дисперсного складу робочого тіла і відповідного обладнання досягається сумісним застосуванням різних рівнів градієнтних технологій сепарації: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної при швидкостях газу до 20 м/с, розмірах частинок аерозолію 1...10 мкм, а також ефективності очищення не нижче 0,99.

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

**Теоретичне значення** мають наступні результати дослідження:

– **концепція** багаторівневої технології градієнтної сепарації аерозольних середовищ робочих тіл двигунів та енергетичних установок шляхом комбінованого використання технологій сепарації різних рівнів: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної, яка покладена в основу **напрямую** створення інноваційного ресурсо- й екологізберігаючого обладнання енергетичних установок і реалізація якої забезпечує підвищення ефективності очищення робочих тіл двигунів понад 99 % від аерозольних домішок розміром менше 10 мкм за рахунок інтенсифікації процесів сепарації та, як наслідок, поліпшення техніко-економічних і екологічних показників двигунів та енергетичних установок;

– принцип багаторівневої сепарації аерозолів робочих тіл двигунів та енергетичних установок з розміром частинок 1...10 мкм комбінованим застосуванням різних способів градієнтної сепарації з послідовним або сумісним їх використанням залежно від складу робочого тіла й відповідного енергетичного обладнання;

– способи раціональної організації процесів очищення робочих тіл двигунів та енергетичних установок за різними механізмами сепарації аерозольних середовищ, параметри та умови формування ділянок осадження, за яких відбувається укрупнення частинок уловленої рідкої фази та її відведення без вторинного винесення в потік і які забезпечують збільшення коефіцієнта уловлювання з 50 до 80 %;

– вдосконалений метод 3D-проекування та дослідження судових систем очищення циклового повітря двигунів від краплинної вологи, які використовують технології інерційної і градієнтної турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної сепарації.

**Практична цінність** результатів дослідження полягає у створенні ефективних, екологічно чистих і ресурсозберігаючих сепараторів на основі узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій, рекомендації з проектування їх проточних частин, схемні та конструктивні рішення з комплексного збереження енергетичних і матеріальних ресурсів в газотурбінних двигунах, двигунах внутрішнього згоряння та системах кондиціювання, які забезпечують поліпшення їх екологічних показників і принципова новизна яких підтверджена патентами й заявками на винаходи.

Новизна одержаних автором наукових результатів, їх значення для теорії і практики свідчать про достатньо високий науковий рівень дисертації.

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

Зміст дисертації відповідає напрямам дослідження, відбиває одержані автором теоретичні та прикладні результати, які у сукупності вирішують поставлену науково-прикладну проблему, що свідчить про завершеність наукового дослідження. Подання матеріалу в логічній послідовності з обґрунтуванням і узагальненням результатів у вигляді висновків по розділах і загальних висновків по роботі сприяє її сприйняттю як цілісного дослідження.

Наведені в роботі наукові результати винесено на захист вперше, вони не перебігаються з результатами кандидатської дисертації, відзначаються новизною, одержані автором особисто, теоретично обґрунтовані й підтвержені експериментально, пройшли широку апробацію на авторитетних міжнародних конференціях, достатньо повно викладені у фахових вітчизняних та закордонних, інших науково-технічних виданнях.

Автореферат адекватно відображає зміст і основні положення роботи.

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

Результати роботи викладені в 31 публікації, з них 19 у фахових наукових виданнях, рекомендованих МОН України для публікації результатів дисертаційних досліджень (8 без співавторів), 1 у міжнародних журналах (без співавторів); 42 доповідях на міжнародних конференціях (10 без співавторів); 4 авторських свідоцтвах (3 без співавторів). У зазначених роботах повністю розкриті основні наукові результати, що становлять суть дисертаційної роботи.

## **10. ЗАУВАЖЕННЯ ДО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

1. У розділі 1 наведено аналіз дисперсного складу аерозолів, які мають місце в енергетичних установках. На рисунку 1.3 значне місце займають частки, розмір яких менше одного мікрона (сажа, смоляний туман, масляний туман), і процеси, за допомогою яких можливе очищення робочих середовищ від цих частинок (дотик, турбулентна дифузія і турбофорез). Однак в результатах досліджень цей діапазон не згадується, що значно звужує діапазон очищення робочого середовища від домішок і визначає напрямок подальших досліджень.

2. У розділі 2 дисертації наведені результати оптичних вимірювань в межах прикордонних шарів робочого середовища з наявністю процесів тепломасообміну коли показник заломлення середовища залежить від місцевих значень температури і концентрації. При цих вимірах поля зміни показника заломлення істотно залежать одночасно від полів температур і концентрацій і від їх зв'язку. Цей зв'язок в роботі не розглядається (стор. 137).



3. При дослідженні різних рівнів градієнтних технологій не зазначені відмінності, викликані фізичним станом частинок (твердим і рідким), а також межі використання показника "діаметр частинки", як під час визначення сил в рівнянні динаміки руху частинок (стор.120).

4. У розділі 3 дисертації допущення про відповідність ліній струму робочого середовища траєкторіях руху аерозольних часток в діапазоні від 1 до 10 мкм не обґрунтовані.

5. При дослідженнях ефективності осадження (сепарації) діапазон розмірів частинок від 1 до 10 мкм без належного обґрунтування замінений дискретними значеннями 1, 3, 5 мкм, що викликає питання щодо ефективності фільтрації частинок домішок проміжних розмірів на рівні 0,99 і вище.

6. У розділі 4 дисертації при реалізації методу планування експерименту його результат представляється у вигляді регресійної залежності, однак жодної з таких залежностей в тексті дисертації не наведено, а результати представлені в табличному і графічному видах.

7. В розділ 4 при описі результатів дослідження акустико-форетичної технологій фільтрації робочого середовища відсутні показники їх впливу на рівень шуму в елементах і системах енергетичних установок, а також вплив вібрації двигунів на показники фільтрації, що не дозволяє достовірно оцінити сумарний ефект при їх використанні.

8. У розділі 5 для підтвердження достовірності впровадження отриманих результатів дослідження необхідно було б привести окремі фотографії впроваджених зразків сепараторів у складі двигунів і енергетичних установок.

9. При компонуванні СЕУ прийнято використовувати модульний принцип компонування сепараційної установки, який передбачає послідовне, паралельне і змішане розташування окремих модулів, проте в роботі відсутні порівняльні показники і критерії вибору конструктивних рішень модулів фільтрації робочої середовища за умови застосування їх у складі різних енергетичних установок.

10. При порівнянні результатів застосування 3-D методів моделювання сепарації в розділі 5 наводяться тільки окремі позитивні характеристики дослідних зразків сепараторів для енергетичного обладнання і систем очищення повітря від крапель рідини і нічого не говориться про можливі негативні характеристики і рекомендації щодо їх зниження з урахуванням спільної роботи сепараційної установки й енергетичного обладнання.

11. У роботі відсутня структуризація результатів впровадження за очікуваними технічними та економічними ефектами, що, значною мірою, не дозволяє аналізувати вплив ефективності фільтрації та осадження шкідливих мікронних частинок робочого середовища на макропоказники двигунів і енергетичних установок.

12. У дисертаційному дослідженні розроблена концепція багаторівневої сепарації робочого середовища потоку теплової енергії, проте не сформульовані напрямки розвитку цієї концепції стосовно короткострокової

та довгострокової перспектив розвитку транспортних і стаціонарних енергетичних установок. На жаль, такий результат в роботі відсутній.

Втім зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

## 11. ВІДПОВІДНІСТЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВИМОГАМ МОН УКРАЇНИ

В результаті вивчення представленої дисертаційної роботи, автореферату і наукових праць можна зробити наступний висновок.

1. Дослідження на тему "Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках" є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові науково обгрунтовані результати, що дають змогу підвищити ефективність суднових енергетичних установок за рахунок очищення робочого тіла теплових двигунів, основу якого становить навколишнє повітря, від різноманітних дисперсних включень рідкої і твердої фаз, а також продуктів згоряння рідких і газоподібних палив.

2. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 "Двигуни та енергетичні установки" за напрямками досліджень: п. 2 – Фізичне та математичне моделювання, системний аналіз і синтез термодинамічних, гідродинамічних, газодинамічних, електродинамічних, електрохімічних та інших процесів у двигунах, енергоустановках та їх елементах; п. 4 – Конструкції двигунів і енергоустановок. Розробка деталей, вузлів, агрегатів; п. 6 – Системи і агрегати двигунів та 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 і шкідливих викидів.

3. Відповідно до пп. 9, 11, 12 "Порядку присудження наукових ступенів" робота відповідає вимогам, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор Рижков Сергій Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 - двигуни та енергетичні установки.

Професор кафедри суднових енергетичних установок  
Національного університету "Одеська морська академія"

д-р техн. наук, доцент

Веретеннік О.М.

Підпис д.т.н., доцента Веретенніка Олександра Михайловича засвідчую:  
Вчений секретар Національного університету  
"Одеська морська академія"

д-р техн. наук, професор



Нікольський В. В.