

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»



РИЖКОВ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 629.12.03

**СЕПАРАЦІЙНІ ГРАДІЄНТНІ АЕРОЗОЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ**

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

Шевцов Анатолій Павлович, доктор технічних наук, професор, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерство освіти і науки України, завідувач кафедри системотехніки морської інфраструктури та енергетичного менеджменту .

Офіційні опоненти:

Варбанець Роман Анатолійович, доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет Міністерство освіти і науки України, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації;

Веретеннік Олександр Михайлович, доктор тех. наук, доцент, Національний університет «Одеська морська академія» Міністерство освіти і науки України професор кафедри суднових енергетичних установок;

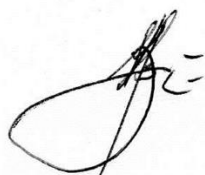
Білека Борис Дмитрович, доктор тех. наук, старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики Національна академія наук України, провідний науковий співробітник відділу нестационарного тепломасопереносу в процесах сушіння.

Захист відбудеться «07» червня 2018 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 Національного університету «Одеська Морська Академія» за адресою: 8, вул. Дідріхсона, м. Одеса, 65029.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Одеська Морська Академія» за адресою: 8, вул. Дідріхсона, м. Одеса, 65029 та за електронною адресою: <http://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>

Автореферат розісланий «04» травня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради



В. В. Нікольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Удосконалення двигунів і енергетичних установок пов'язане зі зростанням їхньої економічності та надійності, а також зниженням маси і габаритів. Це досягається підвищенням початкових параметрів термодинамічних циклів, застосуванням регенерації та утилізації теплоти робочого тіла, нових матеріалів, видів палива і мастила. Використання навколишнього повітря як основи робочого тіла теплових двигунів потребує його очищення від різноманітних дисперсних включень рідкої і твердої фаз до показників, які відповідають експлуатаційним вимогам. Початкові показники дисперсності включень характеризуються розмірами фракцій від одиниці до декількох сотень мікрон. Робоче тіло містить також продукти згоряння рідких і газоподібних палив. Рідкі вуглеводневі палива крім горючих компонентів містять і негорючі включення різного хімічного складу в рідкому та твердому станах.

Актуальність проблеми сепарації фаз обумовлена впливом аерозольних середовищ у робочих тілах двигунів та енергетичних установок на їхні техніко-економічні й екологічні показники. В енергетичних установках цей вплив характеризується залежністю інтенсивності охолодження елементів проточної частини від стану їх забрудненості, якісного та кількісного складу шкідливих викидів у відпрацьованих газах, необоротних втрат мастил, води тощо.

Аерозольні середовища різні за походженням, складом та параметрами, вони є джерелами високо- й низькопотенційної енергії та, в ряді випадків, і дорогих матеріалів. Якісне очищення газів дозволяє не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища енергетичними установками, а й підвищити ресурс їх елементів, знизити споживання палива утилізацією низькопотенційної енергії газопарових викидів, скоротити втрати цінних матеріалів. У новому поколінні сепараційних газоочисних пристроїв необхідно розширювати матеріалозберігаючі функції, а також застосовувати не задіяні раніше енергоресурси самих газових викидів для цілей очищення. Технічна досконалість сепаруючих пристроїв характеризується масогабаритними показниками, витратами енергії на переміщення робочих середовищ, технологічністю. Інтенсифікація процесів осадження частинок – один з ефективних способів зниження маси і габаритів, підвищення економічності та надійності роботи газоочисного пристрою.

У теперішній час мають місце сепараційні технології і пристрої, що їх реалізують, які здатні очищувати від частинок розміром більше 10 мкм з ефективністю не менше 0,99. Очищення газових і рідких середовищ від частинок менше 10 мкм менш ефективне і потребує розробки газоочисного сепараційного обладнання, здатного уловлювати частинки таких розмірів і застосовувати ресурсозберігаючі можливості самих установок за рахунок використання енергії 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-

дослідних держбюджетних і госпдоговірних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова в рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні. Наведені в дисертації матеріали узагальнюють результати досліджень, виконаних автором у рамках 15 фундаментальних науково-дослідних держбюджетних і госпдоговірних робіт з номерами реєстрації: 0117U000350, 0109U002930, 0113U000241, 0110U001322, 0107U000711, 0103U001794, 0109U002928, 0115U000303, 0111U009084, 0111U002310, 0109U007601, 1875, 1918 та контрактів № 11.2014/01 і 11. 04/2016/1, в яких він брав участь як науковий керівник (5 робіт), відповідальний виконавець (7) і виконавець (3).

Метою дисертаційної роботи є створення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементація в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок.

Завдання дослідження:

- виконати аналіз процесів перенесення частинок у дисперсних багатофазних потоках енергетичних установок і виявити перспективні способи інтенсифікації процесів очищення за рахунок сил інерції, акустикофореzu, турбофореzu, неізотермічної градієнтної сепарації та ін.;
- розробити узагальнену математичну модель процесів сепарації градієнтних аерозольних технологій та обґрунтувати методи дослідження;
- розробити схемні рішення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій;
- 3D-модельюванням на основі сучасних пакетів прикладних програм і числовими методами розрахунку дослідити закономірності процесів перенесення частинок у дисперсних багатофазних потоках та сепараційному обладнанні;
- експериментальними методами голографічної інтерферометрії в реальному часі, оптичними вимірюваннями дисперсності, концентрації фаз і контактної взаємодії обґрунтувати підвищення енергозберігаючих та екологічних показників при інтенсифікації процесів очищення;
- обґрунтувати методологію узагальнення результатів дослідження градієнтних процесів перенесення при очищенні аерозольних середовищ;
- науково обґрунтувати створення інноваційних технологій очищення й пристроїв, що їх реалізують, для сучасних і перспективних енергетичних установок;
- довести достовірність отриманих наукових положень результатами натурних випробувань та експлуатації систем і пристроїв з інтенсифікацією процесів очищення у складі елементів та систем енергетичних установок.

Об'єктом дослідження є технології інтенсифікації процесів сепарації в аерозольних дисперсних середовищах, а **предметом дослідження** – процеси очищення в сепараторах та їх фракційні й інтегральні показники.

Методи дослідження. Удосконалення технологій інтенсифікації процесів сепарації в аерозольних дисперсних середовищах для розробки широкого діапазону сепаруючого обладнання забезпечено теоретико-експериментальним розв'язанням дослідницьких завдань на єдиній методологічній основі. Розв'язання рівнянь математичних моделей турбулентного перенесення в технологіях інтенсифікації осадження здійснено 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.

У результаті виконаних наукових досліджень отримав подальший розвиток **напрямок** створення інноваційного ресурсо- й екологозберігаючого обладнання енергетичних установок на основі градієнтних технологій сепарації аерозольних середовищ та розроблена **концепція** багаторівневої сепарації шляхом комбінованого використання різних рівнів технологій сепарації: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної, яка покладена в його основу 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.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Уперше методами фізичного та математичного моделювання термоаеродинамічних і акустичних процесів багатofазних 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 унаслідок осадження 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 багатofазних 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. Отримали подальший розвиток розробка та дослідження схемних і конструктивних рішень (конструктивні схеми та рекомендації з побудови елементів) підвищення ефективності комплексного збереження енергетичних і матеріальних ресурсів газотурбінних двигунів, двигунів внутрішнього згоряння та систем

кондиціювання з поліпшенням їх екологічних показників, принципова новизна яких підтверджена патентами й заявками на винаходи.

5. Отримав подальший розвиток метод 3D-проектування та дослідження систем і агрегатів двигунів та енергетичних установок: пневмосистем і систем картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, 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 сепарацій.

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 аерозолі 1...10 мкм, а також ефективності очищення не нижче 0,99.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні ефективних, екологічно чистих і ресурсозберігаючих сепараторів на основі узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та у розробці рекомендацій з проектування їх проточних частин.

Результати роботи впроваджені: отримано 16 актів упровадження роботи, зокрема у ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект» (м. Миколаїв) – сепаратор для первинного очищення паливних газів від твердої та рідкої фракцій; ПАТ «Завод «Екватор» (м. Миколаїв) – система очищення повітря від краплинної вологи; «Batumi Navigation Teaching University LTD» (Грузія) – судновий сепаратор для очищення повітря в машинному відділенні; «Georgian Veritas LTD», «Marine technical service LTD», «Sea service LTD» (Грузія) – сепаратор для очищення стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском; ДП ПКБ «Чорноморсуднопроект» (м. Миколаїв) – система очищення повітря від краплинної

вологи для технічного кондиціонування приміщень машинного відділення; «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) – система контролю та розділення різнорідних рідких речовин (вода, масло та ін.); «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) – технологія для системи очищення та розділення для водневого блока; «QUZHOU AISHANG INDUSTRIAL DESIGN CO LTD» (Китай) – сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10; «ZHEJIANG ACME INFO TECHNOLOGY CO LTD» (Китай) – сепаратор стиснутих газів енергосистем; «SHENGZHOU ALENT ENTERPRISE MANAGMENT CONSULTING CO LTD» (Китай) – плоский термофоретичний сепаратор; «ZHEJIANG YUNDYNAMIC INVESTMENT MANAGMENT CO LTD» (Китай) – циліндричний термофоретичний сепаратор; «QUZHOU MEICHUANG INSTRUMENT CO LTD» (Китай) – система очищення повітря від краплинної вологи; «SHENGZHOU SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATION SERVICE CENTER» (Китай) – акустикофоретичний сепаратор для ГТД; «Jiangsu University of Science and Techology» (Китай) – технологія вимірювання параметрів середовища та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

Особистий внесок здобувача полягає у створенні узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементації в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок за допомогою пакетів обчислювальної гідродинаміки у тривимірній постановці, а також методах та результатах теоретичних розрахунків процесів осадження полідисперсних частинок у сепараторах, проведенні стендових випробувань й узагальненні результатів експериментальних досліджень сепараторів з використанням багаторівневих технологій сепарації. Основні наукові результати теоретичних та експериментальних досліджень отримані автором особисто. В основних фахових наукових роботах, що виконані у співавторстві, особистий внесок автора наступний: результати дослідження впливу неізотермічності на характеристики дисперсного двофазного потоку в елементі гофрованого коагулятора [1]; обґрунтування інтенсифікації очищення градієнтними технологіями сепарації [2–5, 7, 8]; математичне моделювання газодинаміки сепараційного обладнання за допомогою адаптованої RSM-моделі при $u_0 = 25$ м/с для установки Екопір 18 М [9]; розробка робочого каналу експериментальної установки для візуалізації полідисперсних течій у неізотермічних умовах для елементів сепараційного обладнання методом голографічної інтерферометрії та результати досліджень [10]; визначення й реалізація параметрів і умов ефективного застосування багаторівневих технологій очищення робочих тіл [11, 15, 28, 29-31].

У решті публікацій додаткового характеру особистий внесок співавторів розподілений рівномірно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях: Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: Матеріали II науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2007; Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2007; Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2008;

Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали I–IV, VI, VII Міжнародних науково-технічних конференцій. – Миколаїв: НУК, 2010–2016; Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VII–X Міжнародних науково-технічних конференцій. – Миколаїв: НУК, 2012 – 2015; Visualization in Science and Education – Gordon Research Conference 2007 Jul 1–6. Bryant University. <http://grc.org/programs.aspx?id=10274>; Granular and Granular-Fluid Flow – Gordon Research Conference 2008 Jun 22–27. <http://grc.org/programs.aspx?id=10334>; The 1–5-th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization 2011–2014, 2016 (Nanjing, China). <http://en.cittc.org/>; Jiangsu, China – 2017 Cooperation Symposium for Top Universities and Institutes – 2017 (Nanjing, China). <http://en.cittc.org/>.

Публікації. Основні положення та результати проведених досліджень відображені в 31 друкованих наукових працях, з них основних публікацій у наукових спеціалізованих виданнях, рекомендованих переліком ДАК МОН України, – 19 (8 – без співавторів); публікацій у міжнародних журналах – 1 (без співавторів); доповідей на міжнародних конференціях – 42 (з них 10 – без співавторів); патентів – 4 (з них 2 – без співавторів).

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновку, списку з 179 використаних джерел і 6 додатків. У додатках наведені акти та інші матеріали, що підтверджують результати досліджень і впровадження. Повний обсяг дисертації складає 424 сторінки, включаючи 270 сторінок основного машинописного тексту, 120 рисунків (на 108 сторінках), 56 таблиць (на 43 сторінках). Перелік джерел посилання розміщений на 21 сторінці, додатки – на 68 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми досліджень, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано проблему, об'єкт та предмет, мету і головні завдання дослідження, наведено методи дослідження, дано обґрунтування достовірності отриманих результатів та висновків, визначено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, відображено повноту викладення результатів у публікаціях і ступінь їх апробації на конференціях.

У **першому розділі** «Основи сепарації аерозольних середовищ в енергетичних установках» проаналізовано основи сепарації аерозольних середовищ в енергетичних установках. Розглядом різних аспектів цієї проблеми займаються у багатьох університетах, проектних та конструкторських організаціях як в Україні: ІТТФ НАНУ, НТУУ «КПІ» (м. Київ), ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект», НУК ім. адмірала Макарова (м. Миколаїв), ДП Запорізьке МКБ «Прогрес», ПАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), Selton (м. Київ), так і за кордоном: Інститут тепломасообміну (Білорусь), General Electric Company (США), Siemens Westinghouse (Німеччина), British Gas (Великобританія). Результати досліджень із зазначеної проблематики наведено в багатьох роботах зарубіжних і вітчизняних учених.

Аналіз результатів цих досліджень свідчить, що у теперішній час сепараційні технології і пристрої, що їх реалізують, здатні здійснювати очищення від частинок розміром більше 10 мкм з ефективністю не менше 0,99. Очищення газових і рідких середовищ від частинок менше 10 мкм менш ефективне і потребує розробки газоочисного сепараційного обладнання, здатного уловлювати частинки таких

розмірів і застосовувати ресурсозберігаючі можливості самих установок за рахунок використання енергії робочого тіла.

Виявлені резерви поліпшення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів і підвищення надійності експлуатації двигунів та енергетичних установок шляхом створення вискоефективних й економічних сепаруючих пристроїв. Обґрунтовано напрям удосконалення сучасних сепараційних технологій очищення аерозольних середовищ для енергетичних установок шляхом перенесення частинок у градієнтних полях тисків, пульсацій, температур і акустичних коливань. Сформульовано мету та завдання дослідження.

У **другому розділі** «Обґрунтування узагальненої багаторівневої системи й схем градієнтних сепараційних аерозольних технологій та методи досліджень» обґрунтовані узагальнена багаторівнева система і схеми градієнтних сепараційних аерозольних технологій, методи їх дослідження в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок. Теоретико-експериментальне розв'язання дослідницьких завдань виконане на єдиній методологічній основі. При цьому під технологічним сепараційним рівнем маються на увазі різноманітні варіанти комбінування підведення аерозольного середовища та каналів і поверхонь для осадження частинок за рахунок сил різної природи: інерції, градієнтних сил – турбо-, акустикофореzu, неізотермічного градієнта, турбулентної дифузії та ін.

На кожному технологічному рівні використовуються відповідні методи та принципи інтенсифікації осадження грубодисперсних і вискодисперсних аерозольних частинок. Для створення інноваційного ресурсозберігаючого та екологічного обладнання енергетичних установок на основі сучасних методів і механізмів розроблено узагальнену багаторівневу схему градієнтних аерозольних технологій сепарації (рис. 1).

Головною метою розробки схемних рішень багаторівневих градієнтних аерозольних технологій сепарації, а також дослідження методів керування ними є їх спільне використання за наявності в робочій системі істотних градієнтів гідродинамічних і теплофізичних параметрів: температури, тиску, швидкості, густини та ін. Це достатня умова реалізації принципу багаторівневої сепарації аерозольних середовищ у робочих тілах двигунів та енергетичних установок. Необхідною умовою є наявність в аерозольних середовищах мікроаккумуляторів, а також мікрогенераторів або мікротрансформаторів внутрішньої та зовнішньої енергії.

Зазначені умови реалізуються при очищенні аерозольних середовищ у полях градієнтів температур, акустичних коливань, концентрацій і пульсацій при проходженні через багатофункціональні поверхні, що мають здатність сепарувати і коагулювати. У разі уловлювання аерозольних частинок позитивний ефект від аерозольних технологій можна досягти трьома методами.

Перший – використання потоку енергії струминних та відривних течій безпосередньо в потоці для коагуляції частинок в об'ємі й на поверхнях.

Другий – направлення потоків енергії та їх вплив на пристінні й теплові шари поверхонь осадження частинок з їх коагуляцією. При використанні цього методу в робочому каналі створюються градієнтні поля температур або акустичних коливань, пульсацій. Перепад температур досягається шляхом охолодження стінок і коагуляційних поверхонь робочого каналу.

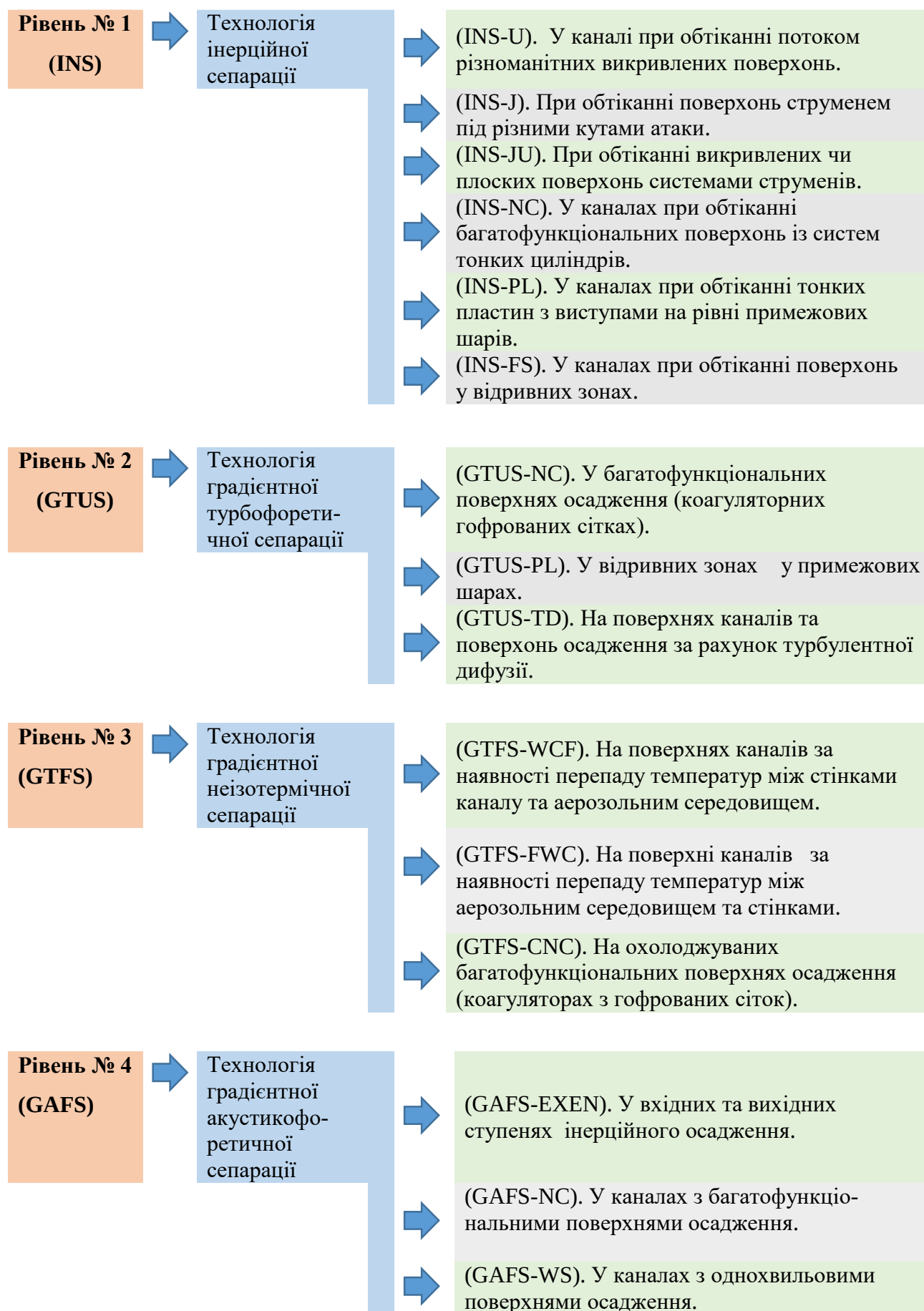


Рисунок 1 – Багаторівнева схема градієнтних аерозольних технологій

Третій – створення акустичних та електромагнітних імпульсних впливів на потік і сепаруючу поверхню за допомогою спеціальних генераторів імпульсів.

При обґрунтуванні теоретичних методів дослідження процесу сепарації в аерозольних градієнтних технологіях використана узагальнена математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що відповідають законам збереження імпульсу, енергії і маси при турбулентному русі в'язкої рідини з умовами однозначності. Модель напружень Рейнольдса дозволяє враховувати анізотропність турбулентної в'язкості шляхом введення в систему рівнянь Нав'є–Стокса індивідуальних рівнянь транспорту напружень Рейнольдса й рівняння для коефіцієнта дисипації. Це дає змогу застосовувати додаткові транспортні рівняння для розв'язання тривимірних завдань. Моделювання руху окремих частинок виконується за допомогою рівнянь динаміки при дії різних сил.

Рівняння транспорту напружень Рейнольдса $\overline{\rho u'_i u'_j}$ має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user},$$

де $\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j})$ – частинна похідна за часом; $C_{ij} \equiv \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u'_i u'_j})$ – конвективна складова; $D_{T,ij} \equiv -\frac{\partial}{\partial x_k}[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)}]$ – турбулентна дифузія; $D_{L,ij} \equiv -\frac{\partial}{\partial x_k}[\mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u'_i u'_j})]$ – ламінарна дифузія; $P_{ij} \equiv -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)$ – утворення напруженості; $G_{ij} \equiv -\rho \beta (\overline{g_i u'_j \theta} + \overline{g_j u'_i \theta})$ – утворення виштовхувальної сили; $\Phi_{ij} \equiv \overline{p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}$ – напруження тиску; $\varepsilon_{ij} \equiv 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}$ – дисипація; $F_{ij} \equiv -2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm})$ – утворення обертання системи; S_{user} – член, який задається користувачем.

Рівняння енергії

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right],$$

де E – повна енергія; $(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$ – девіаторний тензор напружень.

Рівняння турбулентного масоперенесення отримано шляхом заміни ентальпії на концентрацію частинок дисперсного багатозфазного потоку в рівнянні енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho C)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(D + \frac{\mu_t}{\rho Pr_{tD}} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right].$$

Рівняння нерозривності для потоку має вигляд

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0.$$

Рівняння динаміки руху частинок у газовому потоці

$$\frac{\partial u_p}{\partial x_t} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_D + F_T + F_a,$$

де x_t – величина часу; сили на одиницю маси частинки: $F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k)$ – інерції;

$$F_2 = -0,5 m_k \frac{\partial u_k^2}{\partial y} \text{ – турбофореzu; } F_3 = \left(\frac{P}{P_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x} \text{ – дифузiофореzu; } F_4 = \frac{2K v^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})} (v - v_p) \text{ –}$$

підйомна Саффмана та $\bar{F}_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} \text{Re}$ – опору; P_w – тиск на стінці; p – тиск потоку; d

– діаметр частинки; v_p – швидкість частинки; ρ – густина багатofазних сумішей палив підвищеного тиску; v – швидкість газу; d_{ij} – тензор деформації; $K = 2,594$;

$\text{Re} = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu}$ – число Рейнольдса; u – початкова швидкість потоку; u_p – швидкість частинки; μ – молекулярна в'язкість потоку; неізотермічне осадження F_T для

високодисперсних частинок розраховується як

$$F_T = \frac{(-12 \pi)(\mu \cdot r_k)(\alpha / \alpha_k + C_t \cdot l / r_k)(C_{tm} \cdot l / r_k)}{(1 + 3C_m \cdot l / r_k)(1 + 2\alpha / \alpha_k + C_t \cdot l / r_k)} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y},$$

де α і α_k – коефіцієнти теплопровідності газу й частинки, Вт/(м·°C); r – радіус частинки, м; l – довжина вільного пробігу молекул, м; C_t , C_m ; G_{tm} – коефіцієнти температурного стрибка, в'язкого ковзання, тепловиділення при терті ковзання відповідно; T – температура, К.

Сила, що діє у полі плоскої звукової хвилі λ на частинку радіуса r при $r \ll \lambda$:

$$F_a = 3/(\rho_1 r) E(k r)^4 (1 + 2/9(1 - \delta))^2 / (2 + \delta)^2,$$

де $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число звукової хвилі; E – середня за часом густина енергії акустичного поля, $\delta = \rho/\rho_1$ – відносна густина навколишнього середовища ρ та частинки ρ_1 .

Коефіцієнт опору

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + b_1 \text{Re}^{b_2} \right) + \frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}},$$

де b – поліноміальні коефіцієнти, що задаються.

З наведених вище виразів C_{ij} , $D_{L,ij}$, P_{ij} і F_{ij} обчислюються безпосередньо, а $D_{T,ij}$, G_{ij} , ϕ_{ij} ε_{ij} моделюються у формі, яка дозволяє замкнути систему рівнянь за рахунок моделювання кінетичної енергії турбулентності, коефіцієнтів дисипації, турбулентної в'язкості, граничних умов стінок.

При обґрунтуванні експериментальних методів дослідження процесу сепарації в аерозольних градієнтних технологіях ураховані наступні завдання: верифікація результатів теоретичних розрахунків і адекватність моделей; визначення підвищення енергозберігаючих та екологічних показників при інтенсифікації процесів сепарації аерозольних середовищ; наукове обґрунтування створення інноваційних градієнтних сепараційних аерозольних технологій для сучасних і перспективних енергетичних установок; підтвердження достовірності отриманих наукових положень результатами

експлуатації систем та пристроїв з інтенсифікацією процесів очищення у складі елементів і систем енергетичних установок.

Для реалізації експериментальних методів розроблено експериментальні стенди для дослідження потоку методом голографічної інтерферометрії, сепараторів аерозолів з підвищеною концентрацією рідкої фази, очищення вискодисперсних аерозольних середовищ.

Експериментальні дослідження виконані з використанням методів поверхневої індикації потоку; розрахунок концентрацій дисперсної фази здійснювався ваговим методом за допомогою аналітичних терезів, фільтрів, фотоелектричних лічильників і фотометрів аерозолів.

Наведені програма-методика проведення вимірювань та оцінка похибки вимірювань. Абсолютна похибка визначення зміни маси аналітичних фільтрів на вагах типу ВРЛ склала 0,5 мг. Перепад тисків на чашкових манометрах визначався з абсолютною похибкою 0,2 мм вод. ст., мікроманометра типу МКВ – 0,1 мм вод.ст., U-подібного манометра – 0,5 мм вод.ст. Відносна похибка визначення розрахункової кількості частинок фотоелектричним лічильником АЗ-5 і фотометром аерозолів ФАН У4.2 склала 5 %.

Непряме вимірювання витрати повітря має відносну похибку 3,5 %, а вимірювання осадження частинок – 4,5 %. Відносна похибка непрямого вимірювання концентрації частинок склала 3 %.

У **третьому розділі** «Дослідження інерційного і турбофоретичного рівнів градієнтних аерозольних технологій» отримано наступні результати. За допомогою фізичного моделювання та візуалізації процесів обтікання струминним потоком поверхонь голографічної інтерферометрії в реальному часі досліджено обтікання поверхонь струменями та багатофункціональних поверхонь осадження.

Отримано кінограми термограм, які відображали шукану теплову й гідродинамічну обстановку потоку в каналі, кінограми інтерферограм для випадку із циліндричним та плоским каналами з різними висотами й швидкостями витікання 1...25 м/с. Межі потоку видно у вигляді темних і світлих смуг, які відповідали ізотермам. Отримані термограми дозволяють здійснити візуалізацію неізотермічного високотурбулентного потоку. На них видно зародження процесу відриву шару за межі потоку. Зародження викидів відбувається через кожні 25 мкс.

Перегляд динаміки процесу на кінопроекторі підтвердив характер масообміну: досліджувана зона пульсує, викидаючи великі об'єми газу, що заповнюють майже весь переріз каналу.

На основі розрахунків тривимірної моделі для плоского, увігнутого, увігнуто-опуклого каналів осадження в каналах з різним кутом атаки струменя 30, 60 і 90° запропоновані елементи сепараційного обладнання. Розрахунок осадження і збільшення частинок у нестационарних умовах виконано при сталій осередненій швидкості витікання газового струменя з вхідного сопла від 10...30 м/с. Установлено, що при відстані від стінки до сопла до $2,0d$ спостерігаються підвищені значення кінетичної енергії турбулентності, в яких формуються поля осадження і збільшення частинок рідкої фази та мінімальне винесення частинок з вхідних систем інерційних сопел 89 % для частинок до 3 мкм при швидкості 3 м/с. За результатами досліджень були вибрані наступні перспективні варіативні схеми інерційних сопел: нормальне

обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем плоскої поверхні; обтікання плоским струменем та вісесиметричним струменем поверхні під різними кутами; обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем увігнутої та опуклої поверхонь під різними кутами. Їх комбінування дозволяє створювати високоефективні інерційні ступені очищення для сепараційних градієнтних аерозольних технологій.

Для розробки суднових систем очищення повітря від краплинної вологи було досліджено сепаруючий профіль з наступними параметрами: $R_1 = (0,05...0,50) \cdot L$; $h = (0,5...5,0) \cdot R_1$; $R_2 = (0,01...1,00) \cdot L$.

Математичне моделювання осадження у сепаруючому профілі виконане при діаметрі частинок 1...3 мкм, концентрації рідкої фази (H_2O) 5, 10, 15, 20 % та діапазоні швидкостей 5, 10, 15, 20 м/с. При моделюванні були розв'язані задачі у нестационарних умовах з кінцевим шагом у часі для досягнення траєкторії руху частинок методом Raising Rambler поверхонь осадження – стінок профіля або площі виходу в розрахунковій сітці. При розрахунку враховувалося, що у випадку збігу траєкторії руху частинок вони об'єднуються. Частинка вважається уловленою у випадку, якщо її траєкторія руху збігається зі стінкою каналу.

При швидкостях повітря 5...10 м/с для профілю з довжиною 80 мм та радіусом 15 мм коефіцієнт осадження складає 99,9...99,1 %. При збільшенні швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази і коефіцієнт осадження спадає до 74,9 %.

У результаті розрахунку встановлено, що найбільш ефективними є канал осадження з радіусом 15 мм та діапазон швидкостей 1...10 м/с.

У **четвертому розділі** «Дослідження неізотермічного та акустико-форетичного рівнів градієнтних аерозольних технологій» досліджено неізотермічний і акустикофоретичний рівні градієнтних аерозольних технологій та отримано результати для багатофункціональних поверхонь каналів. Експериментально фізичним моделюванням досліджено структури потоку, які порівняно з розрахунками (рис. 2), та встановлено, що отримані за допомогою кінозйомки термограми задовільно узгоджуються з даними розрахунків, що свідчить про достовірність прийнятої фізичної моделі процесу.

Незначні відмінності обумовлені розбіжністю до 12 % експериментальних та розрахункових даних. Результат визначення поля температур наведений у вигляді набору ізоліній, діаграми температурного градієнта, отриманих в середовищі програмного забезпечення. Установлено, що максимальний градієнт температури спостерігається на перетині ліній, який є максимально наближеним до поверхні осадження.

Температура шарів середовища над елементами сітки практично дорівнює температурі поверхні осадження (температура стінки $T_c = 20$ °C), а максимальна температура майже відповідає температурі потоку ($T_0 = 110$ °C). Установлено, що найбільший вплив перепаду температур на рух частинок дисперсної фази в коагуляторі спостерігається при малих швидкостях.

Збільшення швидкості потоку на вході в коагулятор інтенсифікує осадження за рахунок турбофорезу та інерції, а тепловий ефект від дії неізотермічної градієнтної технології й дифузіїфорезу знижується, і навпаки. Так, надбавка за рахунок теплового

ефекту до уловлювання частинок діаметром 1 мкм при $u_{\text{вх}} = 9,5$ м/с складає близько 40 %, а при $u_{\text{вх}} = 13$ м/с усього лише 10 %.

Установлено відсутність впливу неізотермічності на гідродинамічні характеристики потоку в сітковому коагуляторі та визначено, що розподіл основних гідродинамічних характеристик потоку (швидкості, інтенсивності турбулентності, кінетичної енергії турбулентності, статичного тиску) практично однаковий для інтервалу перепаду температур $0 \dots 80$ °C і швидкості потоку $0,5 \dots 7,0$ м/с.

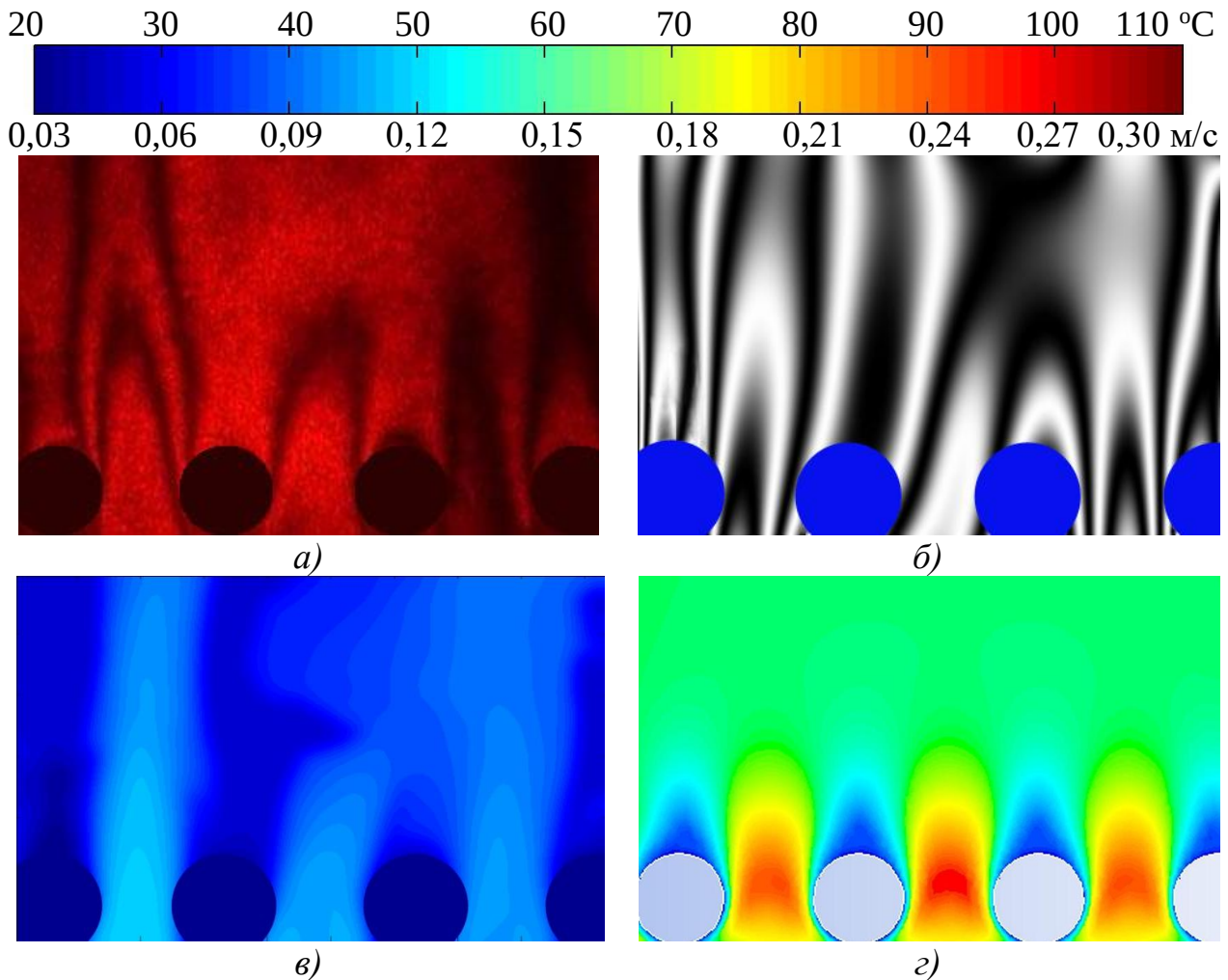


Рисунок 2 – Розподіл величин (5 секунда):

а) кадр кінограми; б) відновлена інтерферограма; в) розподіл температури по відновленій інтерферограмі; з) розподіл швидкості

Для дослідження сепараційних характеристик акустикофоретичної технології в багатофункціональних поверхнях каналів побудовано ряд розрахункових сіток у тривимірній постановці задачі. Для точності розрахунків у програмному пакеті застосовувався критерій збіжності 10^{-3} для швидкості потоку, умови нерозривності, кінетичної енергії турбулентності та напруження Рейнольдса. При дослідженнях вхідна концентрація дисперсної фази складала 100 мг/м^3 ; мінімальний діаметр частинок 1 мкм, а максимальний – 3 мкм; діапазон початкових швидкостей потоку

0,5...20,0 м/с. На рис. 3 зображено залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від швидкості в каналі з п'ятьма рядами коагуляційної сітки.

Розрахунки показують, що поперечні пульсації значно збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...5,0 м/с: від 15,0 до 46,3 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с та від 48,7 до 66,7 % при початковій швидкості потоку 5 м/с. Ультразвук малоефективний щодо високодисперсних аерозолів та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання (від 48,1 до 68,0 %) при діаметрі частинок більше 5 мкм.

При осадженні частинок різних розмірів, яке відбувається при різній частоті коливань, для менших частинок необхідна вища частота. Результати розрахунків свідчать, що при частоті ультразвукових коливань на рівні 10 кГц розміри уловлюваних частинок аерозолів лежать у діапазоні 1...5 мкм. Зі збільшенням дисперсності аерозолів застосування ультразвукових хвиль у сепараційному очиснику є недоцільним.

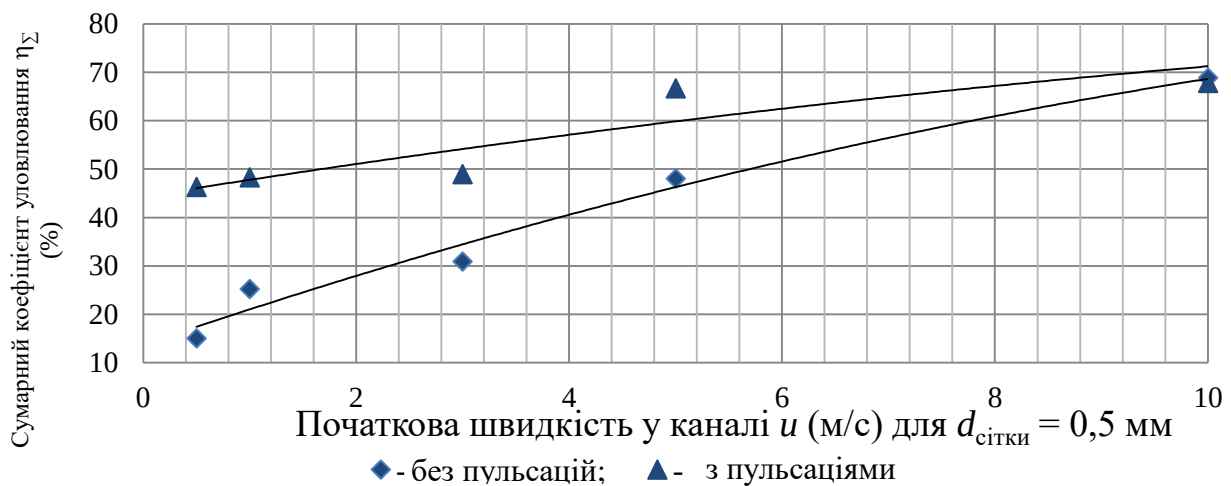


Рисунок 3 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від швидкості в каналі з п'ятьма рядами коагуляційної сітки

За підсумками дослідження сепараційних характеристик акустико-неізотермічної градієнтної технології в багатофункціональних поверхнях каналів встановлено, що використання ультразвуку в елементах сепараційного обладнання обумовлене специфічною властивістю його як виду випромінювання – можливістю створювати направлені ультразвукові поля або пучки. Особливостями даного виду очищення є можливість вибіркового впливу на задану ділянку або іншого середовища, а також можливість селективного приймання сигналів від граничної області простору.

У п'ятому розділі «3D-моделювання та дослідження сепараторів на основі багаторівневих градієнтних аерозольних технологій. Упровадження результатів роботи» здійснено 3D-моделювання та дослідження сепараторів на основі багаторівневих градієнтних аерозольних технологій сепарації. Запропонована модель багаторівневої системи очищення для розробки рекомендацій та побудови пристроїв сепарації дисперсних середовищ для екологічних і економічних енергетичних установок, яка складається з наступних рівнів технологій сепарації: INS – інерційної,

GTUS – градієнтної турбофоретичної, GTFS – градієнтної неізотермічної; GAFS – градієнтної акустикофоретичної. На основі результатів математичного моделювання розроблено конструктивні схеми та рекомендації з побудови пристроїв очищення дисперсних середовищ для екологічних і економічних енергетичних установок: сепараторів для пневмосистем та картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, одно- й багатосекційних неізотермічних сепараторів для енергетичних установок, багатоступінчатих плоских акустикофоретичних сепараторів та ін.

Здійснено 3D-моделювання на основі технологічних рівнів INS та GTUS, 3D-проектування, виготовлення та дослідження дослідних зразків сепаратора картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, сепаратора стиснутих газів енергосистем, сепаруючого елемента суднових систем очищення повітря від краплинної вологи. Підтвердження достовірності методів 3D-моделювання та проектування, а також відповідності проектних і експлуатаційних показників сепаратора (рис. 4) проводилося для діапазону витрат $2...10 \text{ м}^3/\text{год}$ на експериментальному стенді та в натурних умовах у складі двигунів. Аналізувалися газодинамічні показники та їх вплив на коефіцієнти осадження за різних витрат та концентрацій рідкої фази.

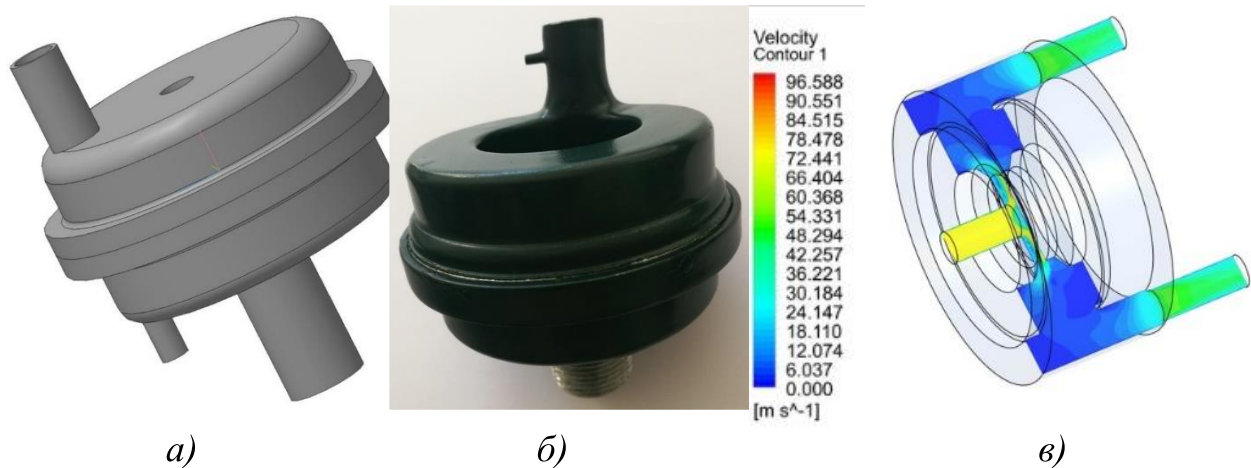


Рисунок 4 – Дослідний зразок сепаратора продуктивністю
 $G = 2...10 \text{ м}^3/\text{год}$:

а) тривимірна модель; б) діючий зразок; в) розрахунок швидкості

Визначено, що відповідно до заданих газодинамічних показників у проточній частині каналу для витрат газу $G = 2...10 \text{ м}^3/\text{год}$ перепад тиску в сепаруючих коагуляторах досягає $0,2...3,5 \text{ кПа}$, коефіцієнт сумарної ефективності очищення від крапель масла складає $99,9 \%$ (вихідна концентрація масла в очищеному повітрі – до $10 \text{ мг}/\text{м}^3$) при вхідній концентрації крапель до $10 \text{ г}/\text{м}^3$ і температурі газу $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищує 10% .

Поліпшення техніко-економічних показників сепаратора та двигуна внутрішнього згоряння забезпечується зміною розмірів сепаруючого каналу, кількості та розміру елементів сепараційних сіток та дозволяє зменшити витрати на виготовлення.

Сепаратори стиснутого газу (рис. 5) створені за модульним принципом, тобто набором типових модулів на такі витрати: $100; 250; 500; 800 \text{ м}^3/\text{год}$. Розрахунок швидкості та тиску в тривимірній моделі сепаратора для пневмосистем на основі

сепараційних аерозольних технологій з 1, 2, 4, 6 струминними модулями виконано при витраті 50...800 м³/год, осадження у струминному модулі при діаметрі частинок 1...10 мкм, концентрації рідкої фази 1, 3, 6, 8, 10 %. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищує 12 %.



Рисунок 5 – Сепаратор стиснутих газів енергосистем:
а) тривимірна модель; б) фото сепаратора; в) розрахунок швидкості

Поліпшення техніко-економічних показників сепаратора забезпечується зміною розріри модулів і елементів, кількості та розміру елементів сепараційних сіток і дозволяє зменшити витрати на виготовлення.

На основі дослідження найбільш ефективного радіуса сепаруючого профілю й визначення робочих швидкостей у каналі була розроблена загальна схема суднових систем очищення повітря від краплинної вологи та створена тривимірна модель елемента сепаратора 1000×500×80 мм (рис. 6).

У результаті розрахункових та експериментальних досліджень на дослідному стенді у вигляді аеродинамічної труби відкритого типу процесів осадження краплинної вологи при початковій швидкості в каналі $U = 1...10$ м/с була встановлена максимальна концентрація рідкої фази для сепаруючого профілю.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено креслення для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи; стандарт підприємства для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи; робочі зразки обладнання.

Відмінності від попередньої моделі наступні: змінено розміри сепаруючого профілю; розміри зменшено на 20 % від попередніх моделей.

Здійснено 3D-модельовання на основі технологічних рівнів INS, GTUS і GTFS,

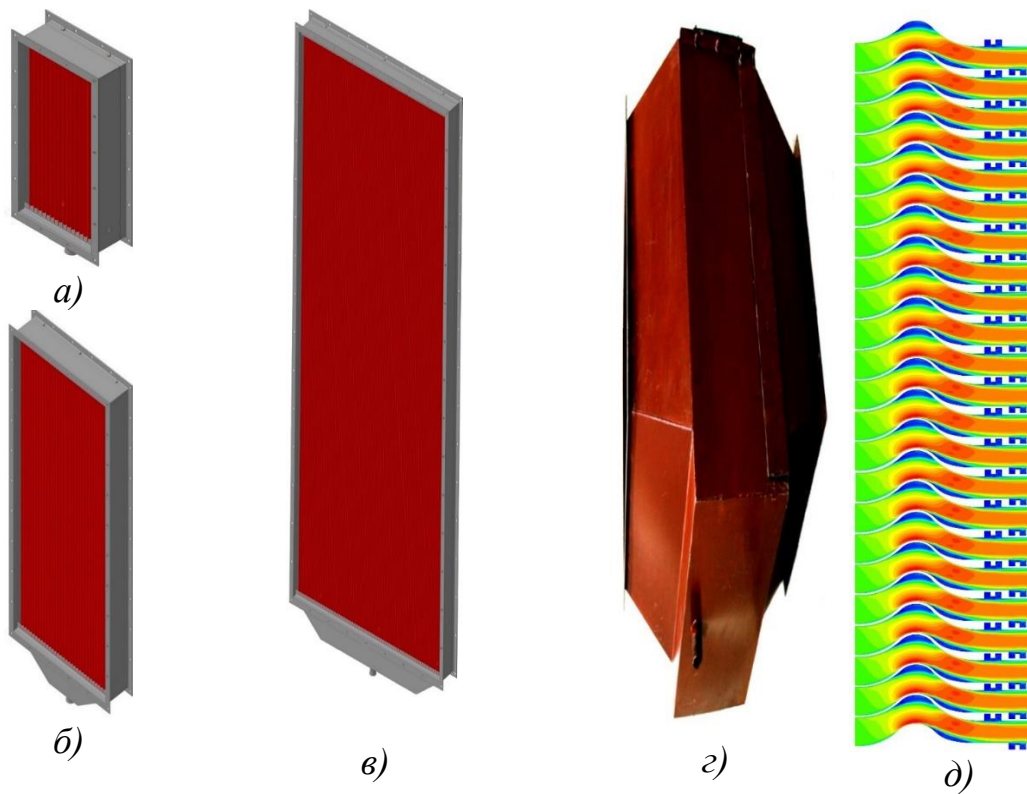


Рисунок 6 – Типова конструкція суднової системи очищення повітря від краплинної вологи з однорядним пакетом сепаруючих профілів і розмірами:

- а) $500 \times 250 \times 80$ мм; б) $1000 \times 500 \times 80$ мм;
 в) $2000 \times 1000 \times 80$ мм; г) робочий зразок обладнання;
 д) розрахунок швидкості

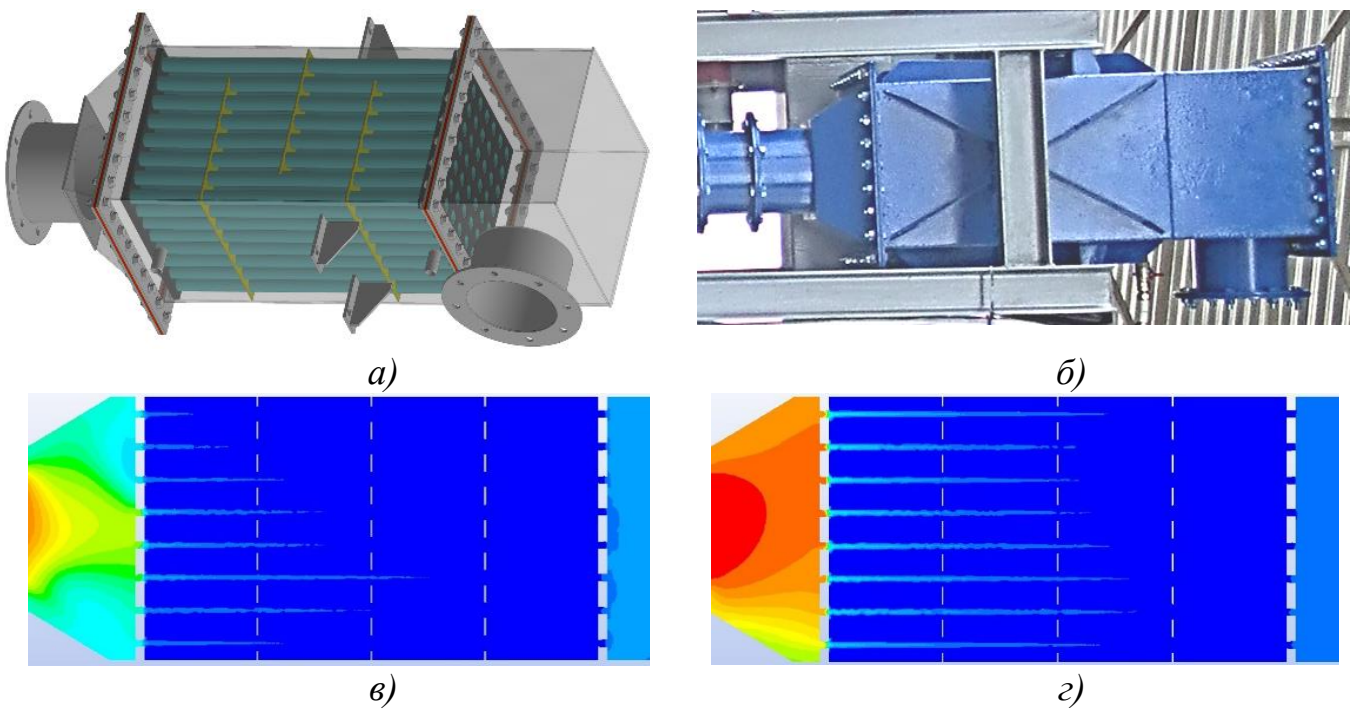


Рисунок 7 – Неізотермічний сепаратор газу:
 а) тривимірна модель; б) фото неізотермічного сепаратора;
 в), г) розрахунок температурного поля в каналі сепаратора

3D-проекування, виготовлення й дослідження дослідних зразків плоского та циліндричного неізотермічних градієнтних сепараторів газу. Для дослідження впливу перепаду температур на процес уловлювання високодисперсних частинок у плоскому трубчастому сепараторі (рис. 7) виконано розрахунок перенесення високодисперсних частинок у неізотермічних умовах; визначено вплив перепаду температур на процес уловлювання високодисперсних аерозолів, що дозволило створити високоефективні газоочисні пристрої з осадженням частинок при діаметрі 3...10 мкм та діапазоні витрат 100...500 м³/год.

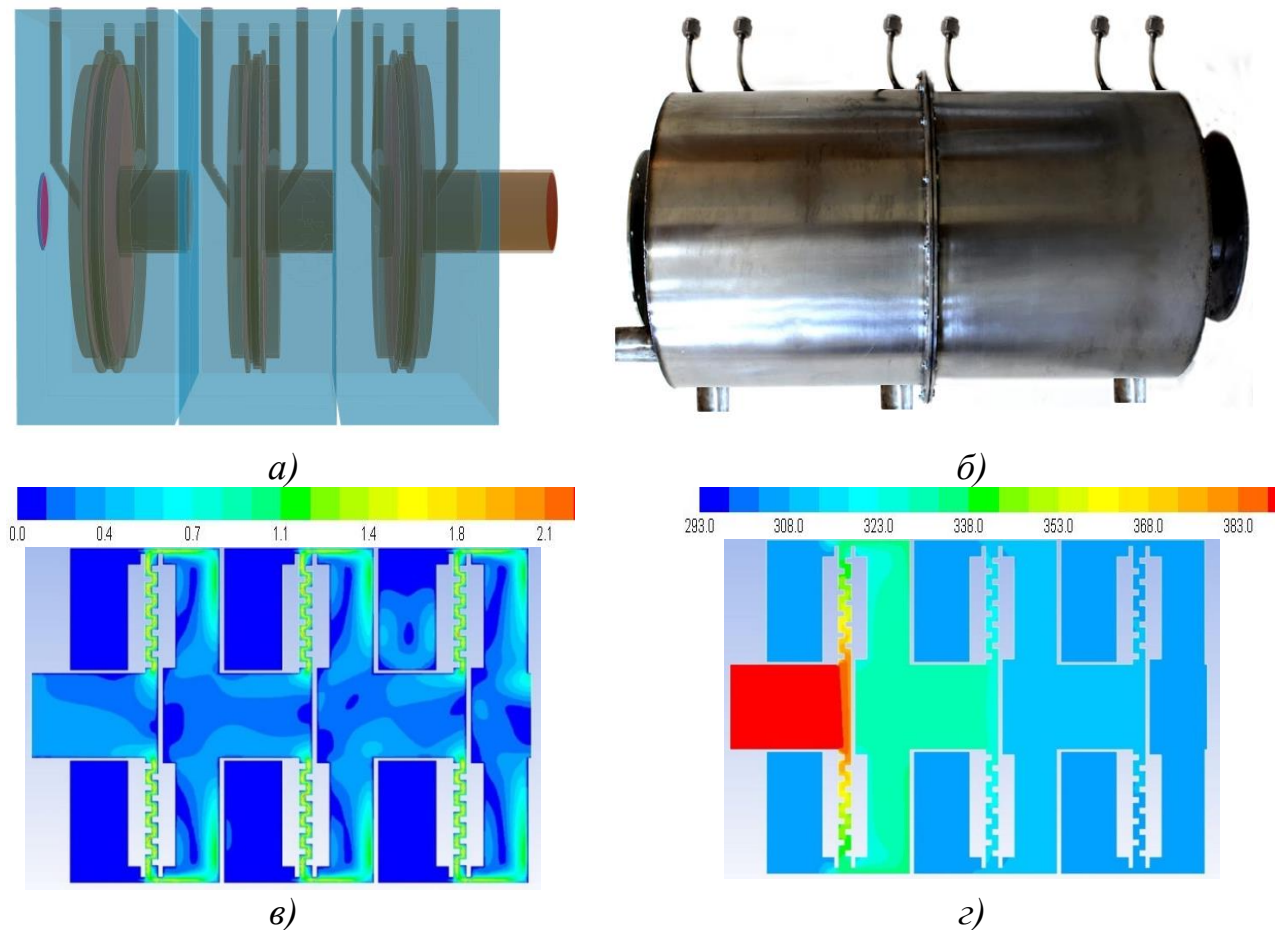


Рисунок 8 – Циліндричний неізотермічний сепаратор:
 а) тривимірна модель; б) фото зразка; в) розподіл швидкості;
 г) розподіл температурного поля при витраті газу 120 м³/год

Установлено, що концентрація аерозолію зменшується зі збільшенням швидкості, а для початкової швидкості $U_0 = 7$ м/с при зміні різниці температур відповідно вихідна концентрація $C_{\text{вих}}$ складає 30,2 і 14,3 мг/м³.

Для розробленого циліндричного неізотермічного сепаратора (рис. 8) визначено розрахункові тривимірні поля температур і швидкостей у робочому каналі неізотермічного градієнтного сепаратора при витраті газу 40...140 м³/год. Установлено, що при витраті газу 40 м³/год вихідна концентрація без охолодження складає 8,1 мг/м³, а з охолодженням – 2,6 мг/м³. Дослідження ефективності віддільника при охолодженні сіткового коагулятора до 20 °С показало позитивний вплив на якість очищення ефекту охолодження. Так, охолодження коагулятора до

температури 20 °С при температурі середовища 80 °С і витраті газу 140 м³/год дозволяє зменшити вихідну концентрацію високодисперсного аерозолію на 25 %.

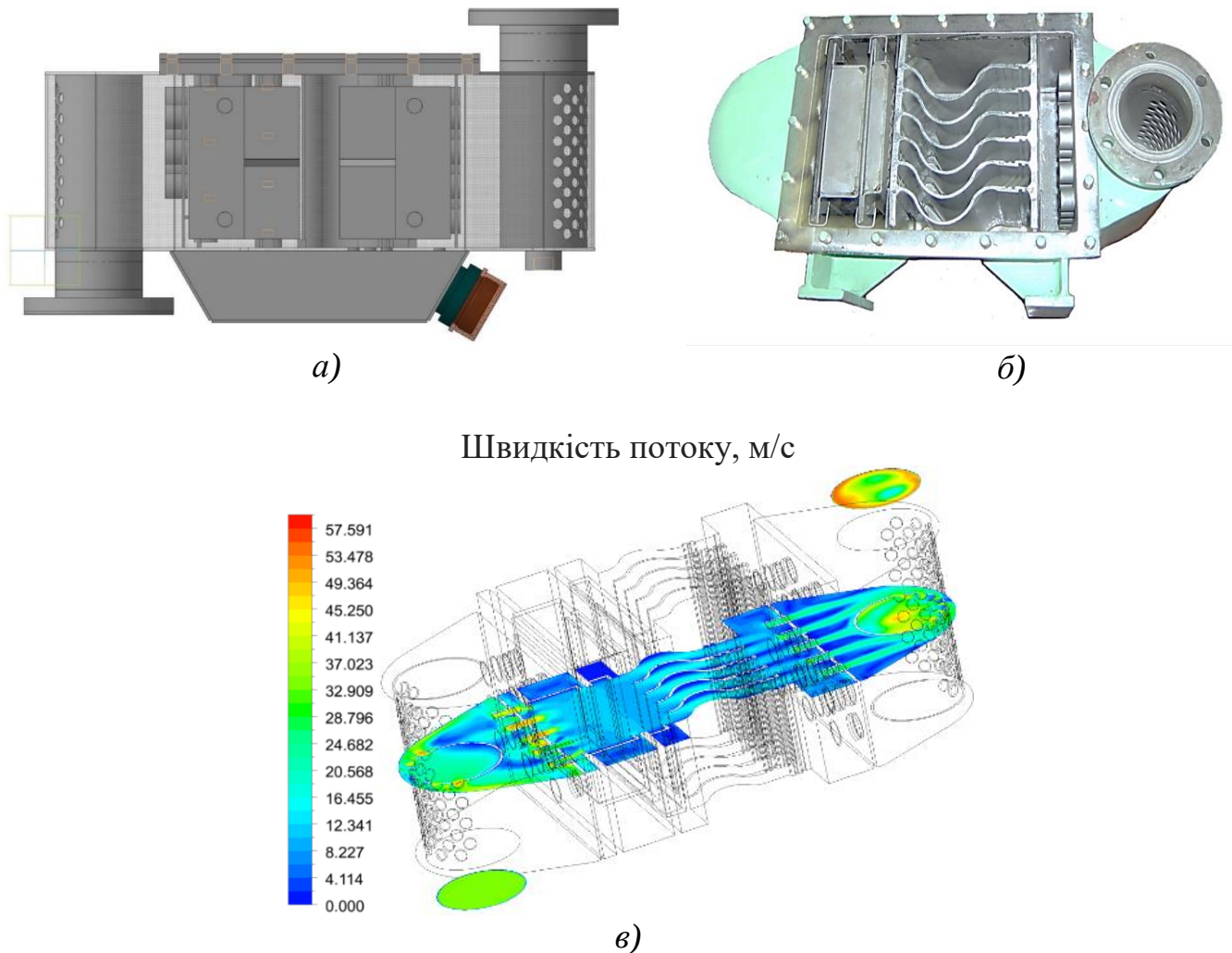


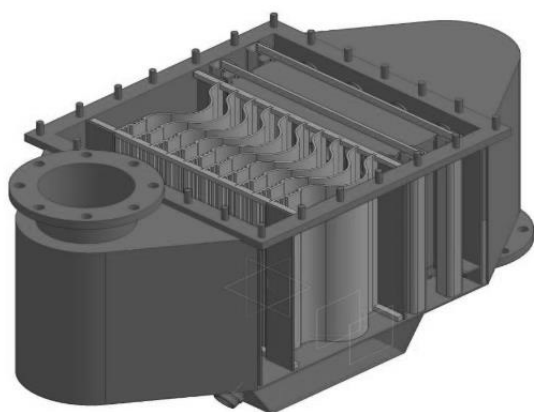
Рисунок 9 – Сепаратор систем суфлювання для $G = 100 \dots 200$ м³/год на основі багаторівневих градієнтних сепараційних технологій:

а) тривимірна модель сепаратора; б) фото сепаратора; в) розрахунок швидкості в сепараторі при $G = 200$ м³/год

Для підтвердження техніко-економічних показників технічного завдання здійснено стендові випробування. При модернізації попередньої моделі сепаратора змінено геометрію каналів у вхідному та вихідному сепаруючих елементах, що інтенсифікує створення градієнтів температур, змінено кількість і типи сепараційних сіток (теплообмінних елементів) з урахуванням розрахунків, що дозволяє зменшити витрати на виготовлення, а також використано оптимізований теплообмінний елемент.

Здійснено 3D-моделювання на основі технологічних рівнів INS, GTUS і GAFS, 3D-проектування, виготовлення та дослідження дослідних зразків масловіддільників систем суфлювання ГТД 4-го покоління. На основі багаторівневих сепараційних градієнтних аерозольних технологій розроблено модернізований сепаратор систем суфлювання ГТД з витратою газу до 200 м³/год (рис. 9). За результатами досліджень

підвищення коефіцієнта осадження за рахунок ультразвукового сепараційного елемента досягає 25,1 %. Для коагулятора коефіцієнт сумарної ефективності очищення від крапель масла при їх вхідній концентрації до $1,5 \text{ кг/м}^3$, витратах газу $100\ldots 200 \text{ м}^3/\text{год}$ за температури 80°C склав 99,9 %.



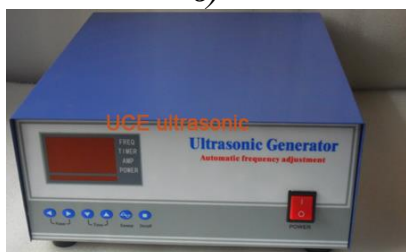
а)



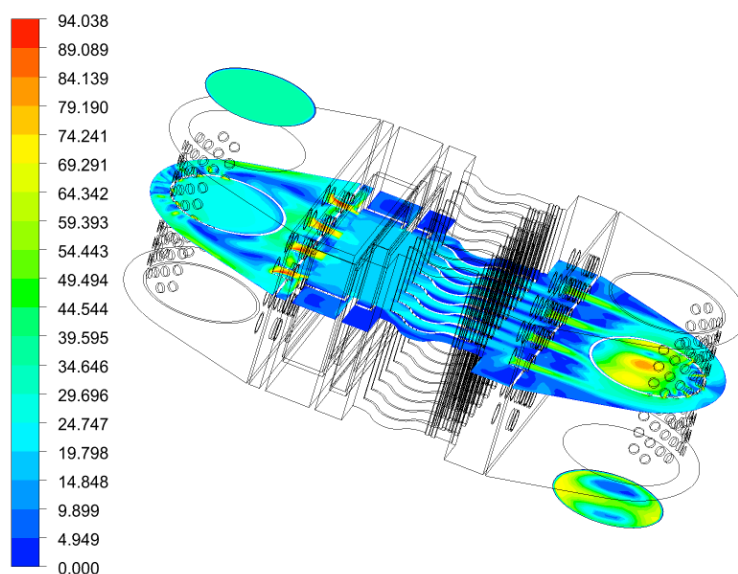
б)



в)



г)



д)

Рисунок 10 – Сепаратор з ультразвуковим модулем для $G = 400\ldots 800 \text{ м}^3/\text{год}$ на основі багаторівневих градієнтних сепараційних технологій:

а) тривимірна модель сепаратора; б) фото сепаратора; в) фото генератора пульсацій; г) електричний модуль пульсатора, д) розподіл швидкості в масловіддільнику при $G = 800 \text{ м}^3/\text{год}$

Подальше дослідження ефективності уловлювання при пульсації сіткового коагулятора з відповідною частотою $u_y = 2A\pi\vartheta \cos(2\pi\vartheta)$, де $A = 0,00002 \text{ мм}$ – амплітуда; $\vartheta = 100000 \text{ Гц}$ – частота коливань, показало позитивний вплив на якість очищення. Так, пульсація коагулятора майже в три рази знизил вихідну концентрацію масла. Загальні втрати масла за наявності пульсаційного коагулятора знижуються приблизно на $\Sigma_{ПСЕ} = 30 \%$ (сумарний пульсаційний сепараційний ефект) при зростанні аеродинамічного

опору на 10 %, а коефіцієнт сумарної ефективності перевищує 99,9 %. На основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій розроблено модернізований акустикофоретичний сепаратор систем суфлювання газотурбінного двигуна з витратою газу до 400...800 м³/год (рис. 10).

Результати розрахунку при $G = 400$ м³/год показали, що сумарний пульсаційний ефект осадження високодисперсних частинок досягає 25,1 %.

Результати стендових випробувань підтвердили, що для коагулятора коефіцієнт сумарної ефективності очищення від крапель масла склав 99,9 % при вхідній концентрації крапель до 0,6 кг/м³, витратах газу 400...800 м³/год і температурі 80 °С. Сумарний пульсаційний ефект осадження високодисперсних частинок досягає 34,7 %.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено креслення акустикофоретичного масловіддільника систем суфлювання ГТД 4-го покоління ДН 80 і ДГ 90 та дослідні зразки обладнання. Відмінності від попереднього обладнання наступні: змінено розміри сопел у вхідному й вихідному сепаруючих елементах, що дозволяє більш ефективно уловлювати грубодисперсні частинки, зменшено розміри сепаруючого профілю до 80 мм та зменшено до 2 кількість відвідних канавок, відповідно зменшено габарити сепаратора, змінено кількість і типи сепараційних сіток, що дає можливість зменшити витрати на виготовлення, додано ультразвуковий пульсаційний елемент, що дозволяє більш ефективно уловлювати високодисперсні аерозолі.

ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. У результаті виконаних наукових досліджень отримав подальший розвиток **напрямок** створення інноваційного ресурсо- й екологозберігаючого обладнання енергетичних установок на основі градієнтних технологій сепарації аерозольних середовищ та розроблена **концепція** багаторівневої сепарації шляхом комбінованого використання різних рівнів технологій сепарації: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної, яка покладена в його основу 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.

2. Виконано аналіз технологій очищення аерозольних середовищ в енергетичних установках та визначено, що напрямками підвищення економічності, екологічності й надійності енергетичних установок є інтенсифікація процесів перенесення полідисперсної фази у градієнтних полях тисків, температур, пульсацій, акустичних коливань і створення високоефективних поверхонь сепарації та сепараторів.

3. Обґрунтовано напрями інтенсифікації перенесення частинок у широкому діапазоні тисків робочих тіл енергетичних установок за рахунок різноманітних силових полів: гравітаційного, інерційного, турбофоретичного, електрофоретичного тощо, вплив яких на ефективність очищення залежить від конструктивних параметрів системи, початкової концентрації та виду забруднень, розподілу фракцій за розмірами.

4. За результатами обґрунтування напрямку дослідження розроблено і реалізовано:

- способи раціональної організації процесів з різними механізмами сепарації аерозольних середовищ і визначено параметри та умови їх ефективного застосування, зокрема швидкість і дисперсність дво- та багатофазних потоків робочих тіл, просторові параметри (форма, розмір і орієнтація поверхонь осадження, потенціали термоаеродинамічних й 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 і які забезпечують збільшення коефіцієнта уловлювання з 50 до 80 % за рахунок інтенсифікації процесів сепарації шляхом використання різних рівнів технологій: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної сепарації;

- узагальнені багаторівневі системи, що є варіантами комбінування підведення аерозольного середовища до каналів і поверхонь для осадження частинок за рахунок різноманітних сил: інерції, градієнтних сил – турбофорезу, акустикофорезу, термічного градієнта, турбулентної дифузії та ін. з їх відведенням під дією сили тяжіння по поверхнях за межі каналів;

- схемні рішення багаторівневих градієнтних аерозольних технологій сепарації, які ґрунтуються на використанні градієнтів гідродинамічних і термічних параметрів: тиску, густини, температури тощо.

5. За показниками ефективності та інтенсивності очищення розроблено наступні рівні градієнтних аерозольних технологій сепарації:

- перший – інерційної, що використовується в каналі при обтіканні потоком різноманітних викривлених поверхонь, поверхонь струменем під різними кутами атаки, викривлених чи плоских поверхонь системами струменів, у каналах при обтіканні багатофункціональних поверхонь із систем тонких циліндрів, тонких пластин з виступами на рівні примезових шарів, поверхонь у відривних зонах;

- другий – турбофоретичної, що застосовується у багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляційних гофрованих сітках), відривних зонах у примезових шарах, на поверхнях каналів та поверхнях осадження за рахунок турбулентної дифузії;

- третій – неізотермічної, що використовується на поверхнях каналів за наявності перепаду температур між стінками каналу й аерозольним середовищем, між аерозольним середовищем і стінками, на охолоджуваних багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляторах з гофрованих сіток);

- четвертий – акустикофоретичної, що застосовується у вхідних і вихідних ступенях інерційного осадження, каналах з багатофункціональними поверхнями осадження, каналах з однохвильовими поверхнями осадження.

6. На основі багаторівневої технології сепарації розроблено схемні рішення з комбінаціями різних рівнів сепарації: інерційної і градієнтної турбофоретичної; інерційної та градієнтної неізотермічної; інерційної, градієнтних неізотермічної і турбофоретичної; інерційної, градієнтних турбо- та акустикофоретичної; інерційної, градієнтних неізотермічної, турбо- й акустикофоретичної; градієнтних неізотермічної, турбо- та акустикофоретичної.

7. 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 унаслідок осадження аерозолі, а також скорочення викидів пари і мастила в навколишнє середовище.

8. Для вирішення завдань з інтенсифікації процесів очищення при розподілі фаз у багатофазних потоках розроблена узагальнена 3D- математична модель процесу сепарації в аерозольних технологіях сепарації, що дозволило вдосконалити методи проектування і дослідження систем та агрегатів енергетичних установок:

- пневмосистем і картерних газів ДВЗ при витратах стиснутого повітря 1...800 м³/год із забезпеченням очищення за 3-м класом чистоти;

- одно- та багатосекційних неізотермічних сепараторів ГТУ з об'ємними витратами 1,0...200,0 і 1,0...100,0 м³/год відповідно при коефіцієнтах уловлювання частинок на рівні 99 %;

- акустикофоретичних сепараторів ГТД, стиснутих газів енергосистем, суднових систем очищення повітря від краплинної вологи при витратах 50...2000 м³/год і тиску 0,1...6,0 МПа та коефіцієнтах уловлювання частинок на рівні 99 %;

- масловіддільників систем суфлювання ГТД шляхом використання результатів тривимірного моделювання процесів в їх елементах.

9. Установлено, що ефективно застосування варіативних схем інерційних сопел у сепараційних градієнтних аерозольних технологіях зі швидкостями в соплі 10...30 м/с при відстані від стінки до сопла до 2,0d забезпечується підвищенням рівня кінетичної енергії турбулентності, внаслідок чого формуються ділянки осадження та укрупнення частинок рідкої фази.

10. Досліджено технології неізотермічної сепарації в багатофункціональних поверхнях осадження та встановлено, що наявність поперечних пульсацій сіток інтенсифікує процес осадження частинок і збільшує значення коефіцієнта уловлювання: в середньому при $U_0 = 1$ м/с – від 5 до 5,88 %, а при $U_0 = 20$ м/с – від 42,5 до 46,5 %.

11. Установлено, що інтенсифікація очищення ультразвуком в акустикофоретичних сепараторах досягається при частоті ультразвукових коливань на рівні 10 кГц для розмірів уловлюваних частинок аерозолів до 5 мкм та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання із 48 до 68 %.

12. Досліджено вплив неізотермічного градієнтного ефекту на концентрацію дисперсної фази: при проходженні коагулятора з ультразвуковою інтенсифікацією та швидкістю 5 м/с неізотермічний градієнтний ефект збільшує коефіцієнт осадження практично у всьому діапазоні діаметрів частинок вище 1 мкм, а при діаметрі частинок до 3 мкм значення сумарного коефіцієнта уловлювання збільшується з 50,2 до 84,6 %. При швидкостях руху середовища від 10 м/с і вище вплив неізотермічних градієнтних ефектів на осадження проявляється несуттєво.

13. Дослідження фізичних моделей процесів очищення фаз у багатофазних потоках, підтвердження достовірності математичних моделей перенесення аерозолі та ефективності експериментальних і дослідних зразків очисної техніки обґрунтовано

експериментальним методом з використанням голографічної інтерферометрії, поверхневої індикації потоку, швидкісної фотозйомки, оптичних вимірювань дисперсності та концентрації частинок на розроблених дослідних стендах.

14. Розвиток методу 3D-проектування та дослідження сепараційного обладнання для систем і агрегатів двигунів та енергетичних установок дозволяє скоротити час упровадження результатів розробок, принципова новизна яких підтверджена патентами й заявками на винаходи, та здійснити оцінку економічного ефекту від упровадження зразків нової сепараційної техніки: пневмосистем і систем картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, одно- та багатосекційних неізотермічних сепараторів газопаротурбінних установок, акустикофоретичних сепараторів і масловіддільників систем суфлювання газотурбінних двигунів, стиснутих газів енергосистем, судових систем очищення повітря від краплинної вологи, в яких використовуються технології інерційної і градієнтних турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної сепарації.

15. Конструктивні схеми та рекомендації з побудови елементів сепараційного обладнання дозволяють підвищити ефективність комплексного збереження енергетичних і матеріальних ресурсів газотурбінних двигунів, двигунів внутрішнього згоряння та систем кондиціонування з поліпшенням їх екологічних показників, а їх достовірність для окремих дослідних зразків очисної техніки пройшла перевірку у складі двигунів, енергетичних установок і технологічних систем.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. **Басок Б. И.** Осаждение жидких частиц газового потока в треугольных каналах под действием градиента температур [Текст] / Б. И. Басок, С. С. Рыжков, Н. А. Гончарова // Промышленная теплотехника [Фахове видання України]. – 2008. – Вип. 6 (т. 30). – С. 28–35. **Видання входить до МНБ – Science Index.**

Автор провів дослідження впливу неізотермічності на характеристики дисперсного двофазного потоку в елементі гофрованого коагулятора.

2. Динамика теплообмена жидкости в грунтовом прямолинейном одиночном трубном элементе (теплообменнике) [Текст] / Б. И. Басок, А. А. Авраменко, С. С. Рыжков, А. А. Лунина // Промышленная теплотехника [Фахове видання України]. – 2009. – Вип. 1, т. 31. – С. 62–67. **Видання входить до МНБ – Science Index.**

Автор провів розрахунки одиночного елемента грунтового теплообмінника, які виконані за допомогою теплофізичних процесів у задачах сезонного вилучення теплоти з грунтового масиву.

3. **Рыжков С. С.** Интенсификация осаждения жидких частиц за счет поперечных пульсаций сеток гофрированного коагулятора [Электронный ресурс] / С. С. Рыжков, Н. А. Гончарова // Вісник НУК. – 2010. – Вип. 1. – Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua>. **Видання входить до МНБ – WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор дослідив вплив поперечних пульсацій сіток гофрованого коагулятора на процес уловлювання вискодисперсних частинок при створенні ізотермічних умов

протікання дисперсного двофазного середовища.

4. **Рыжков С. С.** Исследование газодинамики сепарационного профиля маслоотделителя [Электронный ресурс] / С. С. Рыжков, И. В. Литвинов // Вісник НУК. – 2010. – Вип. 2. – Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua>. **Видання входить до МНБ – WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор виконав гідродинамічний розрахунок характеристик робочого елемента статичного тиску, кінетичної енергії турбулентності, інтенсивності турбулентності.

5. **Рыжков С. С.** Численное моделирование осаждения высокодисперсных частиц в проточной части сепарационного оборудования [Электронный ресурс] / С. С. Рыжков, С. Ю. Пастухов // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2010. – Вип. 3. – Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua>. **Видання входить до МНБ – WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор здійснив оптимізацію проточної частини елемента сепарації шляхом порівняльного аналізу моделей з різними значеннями конструктивного параметра h.

6. **Рыжков С. С.** Исследования газодинамики и теплопереноса турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии [Электронный ресурс] / С. С. Рыжков // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2010. – Вип. 4. – Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua>. **Видання входить до МНБ – WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

7. **Рыжков С. С.** Экспериментальная установка для исследования процессов очистки газовых потоков от жидких высокодисперсных частиц [Текст] / С. С. Рыжков, И. В. Литвинов // Энерготехнологии и ресурсосбережение [Фахове видання України]. – К. : Інститут газу НАН України, 2010. – Вип. 5. – С. 72–76. **Видання входить до МНБ – ВІНІТИ РАН, Ulrich's Periodicals Directory.**

Автор розробив експериментальну установку, для дослідження процесів газових потоків від рідких дисперсних частинок.

8. **Рыжков С. С.** Исследование влияния ультразвуковых волн на коагуляцию полидисперсных аэрозолей в сепарационном оборудовании [Текст] / С. С. Рыжков, Н. А. Гончарова // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. – 2011. – № 3. – С. 102–108. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор розробив теплофізичну модель для розрахунку дисперсних газових потоків в ізотермічних умовах, яка дозволяє вирішувати нестационарні задачі в інтервалі заданого часу.

9. **Рижков С. С.** Интенсификация осаждения высокодисперсных частинок у лабиринтному сепараторі за рахунок термофоретичних ефектів [Текст] / С. С. Рижков, О. В. Ощип // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. – 2011. – Вип. 4. – С. 99–107. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор розрахунковим способом підтвердив експериментальні дані з підвищення ефективності уловлювання високодисперсних частинок у лабиринтних сепараторах.

10. **Рижков С. С.** Математичне моделювання газодинаміки сепараційного обладнання [Електронний ресурс] / С. С. Рижков, О. О. Московко // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2011. – Вип. 4. – Режим доступу :

<http://evn.nuos.edu.ua>. **Видання входить до МНБ – WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор здійснив математичне моделювання газодинаміки сепараційного обладнання за допомогою адаптованої RSM-моделі при $u_0 = 25$ м/с для установки Екопір 18 М.

11. **Рижков С. С.** Дослідження температурного поля в елементі сепараційного обладнання методом голографічної інтерферометрії [Електронний ресурс] / С. С. Рижков, Ю. В. Золотий, Д. В. Довгань // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2011. – Вип. 5. – Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua>. **Видання входить до МНБ – WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор розробив робочий канал експериментальної установки для візуалізації полідисперсних течій у неізотермічних умовах для елементів сепараційного обладнання методом голографічної інтерферометрії.

12. **Рижков С. С.** Результати дослідження впливу підвищення тиску на ефективність турбоімпактних сепараторів багатофазних сумішей палив [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. – 2013. – № 4. – С. 58–61. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

Автор виконав математичне моделювання процесів турбоімпактної сепарації при різних тисках і витратах робочого середовища.

13. **Рижков С. С.** Узагальнена математична модель визначення інтенсивності процесу очистки дисперсних багатофазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. – 2014. – № 3. – С. 69–76. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

14. **Рижков С. С.** Проблеми інтенсифікації очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок і способи їх вирішення (частина 1) [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. – 2014. – № 5. – С. 51–58. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

15. **Рижков С. С.** Проблеми інтенсифікації очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок і способи їх вирішення (частина 2) [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. – 2014. – № 6. – С. 51–57. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

16. Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С. С. Рижков, Б. І. Басок, Р. С. Рижков, О. С. Борцов // Промышленная теплотехника [Фахове видання України]. – 2014. – Т. 36. – Вип. 2. – С. 22–28. **Видання входить до МНБ – Science Index.**

Автор провів дослідження способу інтенсифікації осадження рідкої фази в сепараторах з використанням турбоімпактних процесів багатофазних сумішей палив підвищеного тиску.

17. **Рыжков С. С.** Влияние термофоретических эффектов на процесс улавливания высокодисперсных частиц в трубчатом сепараторе [Текст] / С. С. Рыжков // Промышленная теплотехника [Фахове видання України]. – 2014. – Т. 36. – Вип. 4. –

С. 88–94. *Видання входить до МНБ – Science Index.*

18. **РЫЖКОВ С. С.** Применение аэрозольных градиентных технологий в сепарационном оборудовании для судостроения и морской инфраструктуры [Текст] / С. С. Рыжков // Shipbuilding and marine infrastructure [Фахове видання України]. – 2015. – Вип. 2 (4). – С. 151–163. *Видання входить до МНБ – CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Citefactor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI).*

19. **Рижков С. С.** Імовірнісна оцінка фракційної ефективності уловлювання аерозолів у примезових шарах багатофункціональних поверхонь в енергетичних установках [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. – 2016. – № 3. – С. 36–44. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).*

20. **РЫЖКОВ С. С.** Осаждение аэрозолей в пограничных слоях плоских поверхностей энергетических установок [Текст] / С. С. Рыжков // Збірник наукових праць НУК. – 2016. – № 4. – С. 53–60. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).*

21. **Ryzhkov S. S.** Employing the separation gradient aerosol technologies for designing the oil separators of venting systems in gas turbine engines ($G = 200 \text{ m}^3/\text{h}$) [Text] / S. S. Ryzhkov // Східно-Європейський журнал передових технологій [Міжнародний наукометричний науковий журнал]. – 2017. – Вип. 2. – С. 59–66. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, Scopus.*

22. **Рижков С. С.** Розробка суднових систем очищення повітря від краплинної вологи [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. – 2017. – № 1. – С. 63–79. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).*

23. **РЫЖКОВ С. С.** Трехмерное моделирование сепарационных градиентных аэрозольных технологий маслоотделителей систем суфлирования ГТД с расходом газа до $800 \text{ м}^3/\text{ч}$ [Текст] / С. С. Рыжков // Збірник наукових праць НУК. – 2017. – № 2. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).*

24. **Рижков С. С.** Розробка сепараторів стиснутого повітря на основі тривимірного моделювання [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. – 2017. – № 3. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).*

25. **РЫЖКОВ С. С.** Применение трехмерного моделирования для градиентных аэрозольных технологий сепарации картерных газов ДВС [Текст] / С. С. Рыжков // Shipbuilding and marine infrastructure [Фахове видання України]. – 2017. – Вип. 1 (7). – С. 113–123. *Видання входить до МНБ – CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Citefactor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI).*

26. **РЫЖКОВ С. С.** Исследования вариативных схем инерционных сопел для сепарационных градиентных аэрозольных технологий [Текст] / С. С. Рыжков // Суднові енергетичні установки [Фахове видання України]. – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – № 37. – С. 94–110.

27. **РЫЖКОВ С. С.** Сепарация конденсата в процессах охлаждения воздуха на входе турбинной установки [Текст] / С. С. Рыжков // Авиационно-космическая техника

и технология [Фахове видання України]. – Харьков : ХАИ, 2017. – № 4 (139). – С. 102–105. *Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.*

28. Пат. 64332 Україна, МПК G01B 9/02, G01L 27/00. Установка для дослідження динамічних і теплофізичних характеристик газодинамічних об'єктів / С. С. Рижков (Україна); заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2011 02639 ; заявл. 09.03.2011 ; опубл. 10.11.11. – Бюл. № 21. – 4 с.

29. Пат. 68673 Україна, МПК G01B 9/02. Стенд для дослідження газодинаміки та теплопереносу турбулентних газових середовищ методом голографічної інтерферометрії / С. С. Рижков (Україна) ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2011 09839 ; заявл. 08.08.2011 ; опубл. 10.04.12. – Бюл. № 7. – 4 с.

30. Пат. 102840 Україна, МПК F01M 13/04, B01D 45/08. Пристрій для відокремлення рідини від газу / С. С. Рижков, Р. С. Рижков (Україна) ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2015 04079 ; заявл. 27.04.2015 ; опубл. 25.11.15. – Бюл. № 22. – 4 с.

31. Пат. 114207 Україна, МПК B01D 45/08, F01M 13/04. Пристрій для відокремлення рідини від газу / С. С. Рижков, Р. С. Рижков (Україна) ; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2015 02335 ; заявл. 16.03.2015 ; опубл. 10.05.17. – Бюл. № 9. – 4 с.

Апробація матеріалів дисертації

32. Рыжков С. С. Современные направления комплексных исследований газоочистительных устройств энергоустановок [Текст] / С. С. Рыжков, А. С. Рыжков, Р. С. Рыжков // Муниципальная энергетика: проблемы, решения : материалы II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. – С. 69–72.

Автор розробив теплофізичну модель, яка являє собою транспорт рівняння напружень Рейнольдса і вираз для конвективного теплопереносу на основі рівняння енергії.

33. Рыжков С. С. Экспериментальный стенд для исследований маслоотделителей [Текст] / С. С. Рыжков, А. С. Рыжков // Муниципальная энергетика: проблемы, решения : материалы II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. – С. 110–112.

Автор розробив спеціальний універсальний стенд, у якому було створене модельне двофазне середовище.

34. Рыжков С. С. Верификация результатов расчета гидродинамических процессов однофазных газовых потоков с помощью метода голографической интерферометрии [Текст] / С. С. Рыжков // Судновая энергетика: стан та проблеми : матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. – С. 156–157.

35. Рыжков С. С. Дополнительная очистка воздуха в энергетическом оборудовании за счет тепловых эффектов [Текст] / С. С. Рыжков // Судновая энергетика: стан та проблеми : матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. – С. 252–253.

36. Рыжков С. С. Применение разработанной теплофизической модели для расчета дисперсных газовых потоков в неизотермических условиях [Текст] / С. С.

Рыжков, Н. А. Гончарова // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації : матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2008. – С. 303–304.

Автор провів дослідження впливу неізотермічності на характеристики дисперсного двофазного потоку в елементі гофрованого коагулятора.

37. **Рыжков С. С.** Очистка аэрозольных сред в энергетических установках [Текст] / С. С. Рыжков, Н. А. Гончарова // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації : матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2008. – С. 272–274.

Автор розробив комплексну схему очищення та утилізації високо- й низькодисперсних частинок при струминному обтіканні пластини і каналів у неізометричних умовах.

38. **Рыжков С. С.** Осаждение жидких частиц газового потока в неизомермических каналах [Текст] / С. С. Рыжков, Н. А. Гончарова // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації : матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2008. – С. 256–263.

Автор провів дослідження впливу неізометричності на характеристики дисперсного двофазного потоку в трикутному каналі.

39. **Рыжков С. С.** Газодинамические процессы в сепарационном элементе газоочистительного устройства [Текст] / С. С. Рыжков, И. В. Литвинов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 471–474.

Автор розробив загальну математичну модель для розрахунків газодинамічних процесів у проточній частині газоочисника.

40. **Рыжков С. С.** Методы исследования влияния ультразвуковых колебаний в элементах сепарационного оборудования [Текст] / С. С. Рыжков, Н. А. Гончарова // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 470–471.

Автор провів розрахунки для розподілу гідродинамічних характеристик потоку, а також проаналізував значення коефіцієнта уловлювання високодисперсних частинок у каналах сепарації.

41. Установка автономного электро-, тепло- и холодооспечения [Текст] / С. С. Рыжков, Н. И. Радченко, С. Г. Фордуй, А. П. Хомуленко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 306–311.

Автор здійснив обробку статистичних даних з електричної потужності N_e ГТД та питомої об'ємної витрати газу b_e .

42. **Рыжков С. С.** Оценка инновационных научных разработок судовых энергетических установок [Текст] / С. С. Рыжков, А. П. Шевцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 212–213.

Автор виконав розрахунки показника наукомісткості для ряду проектів різного призначення.

43. **Рыжков С. С.** Термофоретическая очистка воздуха для чистых помещений [Текст] / С. С. Рыжков // Проблеми екології та енергозбереження в

суднобудуванні : матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 131–132.

44. **Рыжков С. С.** Обеспечение экологической безопасности судов за счет комплексной очистки выпускных газов и нефтесодержащих вод [Текст] / С. С. Рыжков, А. С. Рыжков // Проблемы екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 130–131.

Автор виконав дослідження тепломасообміну крапель нафтовмісних вод у газових потоках на спеціальних стендах за допомогою методу моделювання процесів з використанням відео- і кінозйомки, автоматичної обробки даних на ЕОМ.

45. **Рыжков С. С.** Повышение экологической чистоты судов за счет контактной очистки выпускных газов [Текст] / С. С. Рыжков // Проблемы екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 132–133.

46. **Рыжков С. С.** Экспериментальный стенд для дослідження очистки синтез-газу технології екопірогенезіс [Текст] / С. С. Рыжков, О. С. Борцов, Р. С. Рыжков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 378–380.

Автор розробив експериментальний стенд для дослідження очищення синтез-газу.

47. **Рыжков С. С.** Термофоретические сепараторы воздуха для технических помещений [Текст] / С. С. Рыжков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 377–378.

48. **Рижков С. С.** Математична модель турбоімпактного 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 Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 375–377.

Автор запропонував компоненти математичної моделі турбоімпактного перенесення частинок при очищенні синтез-газу технології екопірогенезіс.

49. **Рижков С. С.** Дослідження газодинаміки турбоімпактного сепаратора при очищенні синтез-газу технології екопірогенезіс [Текст] / С. С. Рижков, Р. С. Рижков, О. С. Борцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 372–374.

Автор запропонував технологію турбоімпактного перенесення частинок, що складається з інерційних сил, сил турбофорезу, дифузійфоретичних сил, сили опору для одиниці маси частинки, сили Саффмана.

50. **Рижков С. С.** Теоретичні дослідження процесів осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску з використанням сучасних програмних пакетів [Текст] / С. С. Рижков, Р. С. Рижков, О. С. Борцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 367–368.

Автор побудував розрахункові сітки робочого середовища сепараційного обладнання.

51. **Рижков С. С.** Розрахунок гідродинамічного стану попереднього ступеня сепаратора підвищеного тиску у межах внутрішньої задачі сучасними програмними пакетами ANSYS [Текст] / С. С. Рижков, Р. С. Рижков, О. С. Борцов // Інновації в

суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 366–367.

Автор здійснив дослідження основних гідродинамічних характеристик робочого середовища попереднього ступеня сепаратора у межах внутрішньої задачі.

52. **Рижков С. С.** Дослідження коефіцієнта осадження турбоімпаکتного сепаратора багатofазних сумішей палив підвищеного тиску при різних витратах робочого середовища [Текст] / С. С. Рижков, Р. С. Рижков, О. С. Борцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 364–365.

Автор провів теоретичні та експериментальні дослідження гідродинамічних процесів робочого середовища сепараторів з урахуванням різних умов робочого середовища.

53. **Рижков С. С.** Побудова розрахункових сіток для дослідження газодинамічних турбоімпактних сепараторів на основі програмного пакета ANSYS [Текст] / С. С. Рижков, Р. С. Рижков, О. С. Борцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 363–364.

Автор для дослідження сепаратора побудував сітку в декартовій системі координат за допомогою трикутних сегментів відповідно до робочої геометрії сепаратора.

54. **Рижков С. С.** Вдосконалення масловологовіддільників енергосистем стисненого повітря на основі гідродинамічних розрахунків [Текст] / С. С. Рижков, Р. С. Рижков, О. С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 362–363.

Автор за допомогою програми ANSYS 13.0 FLUENT побудував розрахункові сітки та провів комплексні розрахунки гідродинаміки проточної частини різних конструкцій масловологовіддільників енергосистем стиснутого повітря з вхідною швидкістю $V_0 = 5$ м/с.

55. **Рижков С. С.** Дослідження параметрів трисекційного термофоретичного сепаратора для технології екопірогенезіс [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 356–357.

Автор побудував тривимірну розрахункову модель з тетраедричних елементів у ANSYS CFX, в якій особливий упор зроблений на розв'язання основних рівнянь руху (сполучена алгебраїчна сітка). Газодинамічні характеристики сепаратора досліджено в пакеті прикладних програм Ansys Fluent.

56. **Рижков С. С.** Термофоретичний сепаратор для очищення синтез-газу технології екопірогенезіс [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 355–356.

Автор розробив технологічну послідовність для очищення синтез-газу від твердої та рідкої фракцій.

57. **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 Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 354–355.

Автор на базі розроблених методів інтенсифікації осадження частинок у дисперсних двофазних газових середовищах розробив раціональну технологічну послідовність очищення газів.

58. **Рыжков С. С.** Разработка высокофорсированных гидродинамических методов интенсификации разделения двухфазных сред для экологических и ресурсосберегающих технологий энергетических установок [Текст] / С. С. Рыжков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 350–351.

59. **Рижков С. С.** Дослідження газодинаміки 3D-моделі турбоімпаکتного сепаратора з радіальним коагуляційним елементом палив підвищеного тиску [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 129–131.

Автор для дослідження 3D-моделі турбоімпаکتного сепаратора у пакетному модулі Ansys Iсет побудував тетраедричну розрахункову сітку, яка побудована відповідно до робочої геометрії сепаратора.

60. **Рижков С. С.** Осадження рідкої фази у турбоімпактних сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 132–133.

Автор установив, що найбільші значення осадження рідкої фракції спостерігаються у турбоімпакті сепараторі з радіальним коагуляційним елементом.

61. **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 Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 134–135.

Автор розрахував та отримав оптимальний перепад тиску (0,09 МПа) у ступені попереднього очищення з розміром 20 мм, що відповідає вимогам до сепараційного обладнання.

62. **Рижков С. С.** Турбоімпактний перенос частинок багатофазних сумішей палив підвищеного тиску у межах внутрішньої задачі [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 115–116.

Автор провів дослідження турбоімпаکتного перенесення у межах внутрішньої задачі з використанням розробленої теплофізичної моделі.

63. **Рыжков С. С.** Интенсификация процессов очистки дисперсных двухфазных сред с помощью пульсационных элементов для экологических и ресурсосберегающих технологий [Текст] / С. С. Рыжков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 26–28.

64. **Рыжков С. С.** Градиентные технологии интенсификации процессов очистки в дисперсных средах [Текст] / С. С. Рыжков // Інновації в суднобудуванні та

океанотехніці : матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 240.

65. **Рижков С. С.** Дослідження газодинамічних турбоімпактних сепараторів на основі програмного пакета ANSYS [Текст] / С. С. Рижков, Р. С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали IX Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 37–38.

Автором для дослідження сепаратора побудована сітка в декартовій системі координат за допомогою трикутних сегментів відповідно до робочої геометрії сепаратора. Наведено тетраедричні розрахункові сітки досліджуваних сепараторів, розрахункові сітки, побудовані у пакетному модулі Ansys Workbench без спрощення конструкцій.

66. **Рижков С. С.** Дослідження гідродинаміки сепаратора підвищеного тиску у межах внутрішньої задачі сучасними програмними пакетами ANSYS [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали IX Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 41–42.

Автор для дослідження попереднього ступеня сепаратора використав метод математичного моделювання – пакет прикладних програм типу ANSYS.

67. **Рижков С. С.** Розробка масловологовіддільників 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 Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 92–93.

Автор за допомогою програми ANSYS 13.0 FLUENT побудував розрахункові сітки та провів комплексні розрахунки гідродинаміки проточної частини різних конструкцій масловологовіддільників енергосистем.

68. **Рижков С. С.** Розрахунок осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С. С. Рижков, О. С. Борцов, Р. С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали IX Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 93–94.

Автор згідно з побудованою розрахунковою геометрією дослідив процес осадження полідисперсних частинок у турбоімпактних сепараторах для очищення багатофазних сумішей палив підвищеного тиску в двовимірній постановці.

69. **Рыжков С. С.** Синтез аэрозольных градиентных технологий при интенсификации процессов очистки в дисперсных многофазных средах объектов морской инфраструктуры [Текст] / С. С. Рыжков, А. П. Шевцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 265–266.

Автор для задачі синтезу застосував результати попередніх досліджень методами математичного моделювання та експериментального дослідження зразків сепарації.

70. **Рыжков С. С.** Аэрозольные градиентные технологии как комплексный подход к решению проблем энергосбережения и экологии объектов морской инфраструктуры [Текст] / С. С. Рыжков, А. П. Шевцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали X Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 17–18.

Автор на базі технологічних схем розробив більш досконалі зразки сепарації для газотурбінних двигунів, систем технічного кондиціонування повітря, систем очищення паливного газу, систем відпрацьованих газів енергетичних установок, систем очищення нафтовмісних вод і систем вентиляції картера.

71. **Рыжков С. С.** Моделирование процессов осаждения аэрозолей в пограничных слоях многофункциональных поверхностей энергетических установок [Текст] / С. С. Рыжков, О. С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали XI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 84–85.

Автор здійснив аналіз траєкторії поведінки потоку та отримав розподіл уловлювання частинок у пристінному шарі.

72. **Рижков С. С.** Інтенсифікації імпактурбулентної сепарації газопарорідинної суміші конденсацією [Текст] / С. С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матеріали XI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 132–139.

73. **Рижков С. С.** Розробка аерозольних градієнтних технологій для систем життєзабезпечення суден і кораблів [Текст] / С. С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 123–125.

АНОТАЦІЯ

Рижков С. С. Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, Миколаїв, 2017.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми створення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементації в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок.

Існуючі сепараційні технології і пристрої, що їх реалізують, здатні очищувати від частинок розміром більше 10 мкм з ефективністю не менше 0,99. Очищення газових і рідких середовищ від частинок менше 10 мкм менш ефективне і потребує розробки газоочисного сепараційного обладнання, здатного уловлювати частинки таких розмірів із застосуванням ресурсозберігаючих можливостей самих установок за рахунок використання енергії робочого тіла.

Головною метою розробки схемних рішень багаторівневих градієнтних аерозольних технологій сепарації, а також дослідження методів керування ними є їхнє спільне використання за наявності в робочій системі істотних градієнтів гідродинамічних і теплофізичних параметрів: температури, тиску, швидкості, густини та ін. Мета реалізується за умови достатності істотних градієнтів параметрів у робочих тілах двигунів та енергетичних установок і наявності в аерозольних середовищах

мікроаккумуляторів, а також мікрогенераторів або мікротрансформаторів внутрішньої та зовнішньої енергії.

Усі подібні умови реалізовані при очищенні аерозольних середовищ у полях градієнтів температур, акустичних коливань, концентрацій і пульсацій при проходженні через багатофункціональні поверхні, що мають здатність сепарувати й коагулювати. У разі уловлювання аерозольних частинок позитивний ефект від аерозольних технологій досягнуто трьома методами. Перший метод – використання потоку енергії струминних та відривних течій безпосередньо в потоці для коагуляції частинок в об'ємі й на поверхнях. Другий метод – направлення потоків енергії та їх вплив на пристінні й теплові шари поверхонь осадження частинок з їх коагуляцією. При використанні цього методу в робочому каналі створюються градієнтні поля температур або акустичних коливань, пульсацій. Перепад температур досягається шляхом охолодження стінок і коагуляційних поверхонь робочого каналу. Третій метод – створення акустичних та електромагнітних імпульсних впливів на потік і сепаруючу поверхню за допомогою спеціальних генераторів імпульсів.

У результаті виконаних наукових досліджень отримав подальший розвиток напрям створення інноваційного ресурсо- й екологозберігаючого обладнання енергетичних установок на основі градієнтних технологій сепарації аерозольних середовищ та розроблена концепція багаторівневої сепарації шляхом комбінованого використання різних рівнів технологій сепарації: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної, яка покладена в його основу 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.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні ефективних, екологічно чистих і ресурсозберігаючих сепараторів на основі узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та у розробці рекомендацій з проектування їх проточних частин.

Результати роботи впроваджені у вигляді сепараторів для очищення: паливних газів від твердої та рідкої фракцій, повітря в машинному відділенні судна, стиснутого повітря від рідких і твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском, картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10, стиснутих газів енергосистем; систем: очищення повітря від краплинної вологи для технічного кондиціонування приміщень машинного відділення, контролю та розділення різного роду рідких речовин (вода, масло й ін.); технологій для системи очищення та розділення для водневого блока, вимірювання параметрів середовища й дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу; плоского та циліндричного неізотермічного сепараторів і акустикофоретичного сепаратора для ГТД.

Ключові слова: сепарація, градієнт, аерозоль, технологія, енергетика, установка.

АННОТАЦИЯ

Рыжков С. С. Сепарационные градиентные аэрозольные технологии в энергетических установках. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова Министерства образования и науки Украины, Николаев, 2017.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы создания обобщенных многоуровневых градиентных сепарационных аэрозольных технологий и их имплементации в инновационном ресурсосберегающем и экологическом оборудовании энергетических установок.

Сепарационные технологии и реализующие их устройства способны очищать от частиц размером более 10 мкм с эффективностью не менее 0,99. Очистка газовых и жидких сред от частиц меньше 10 мкм менее эффективна и требует разработки газоочистительного сепарационного оборудования, способного улавливать частицы таких размеров с применением ресурсосберегающих возможностей самих установок за счет использования энергии рабочего тела.

Главной целью разработки схемных решений многоуровневых градиентных аэрозольных технологий, а также исследования методов управления ими является их совместное использование при наличии в рабочей системе существенных градиентов гидродинамических и теплофизических параметров: температуры, давления, скорости, плотности и др. Цель реализуется при условии достаточности существенных градиентов параметров в рабочих телах двигателей и энергетических установок и необходимости наличия в аэрозольных средах микроаккумуляторов, а также микрогенераторов или микротрансформаторов внутренней и внешней энергий.

Все указанные условия реализованы при очистке аэрозольных сред в полях градиентов температур, акустических колебаний, концентраций и пульсаций при прохождении через многофункциональные поверхности, обладающие способностью сепарировать и коагулировать. В случае улавливания аэрозольных частиц положительный эффект от аэрозольных технологий достигается тремя методами. Первый метод – использование потока энергии струйных и отрывных течений непосредственно в потоке для коагуляции частиц в объеме и на поверхностях. Второй метод – направление потоков энергии и их влияние на пристенные и тепловые слои поверхностей осаждения частиц с их коагуляцией. При использовании этого метода в рабочем канале создаются градиентные поля температур или акустических колебаний, пульсаций. Перепад температур достигается путем охлаждения стенок и коагуляционных поверхностей рабочего канала. Третий метод – создание акустических и электромагнитных импульсных воздействий на поток и сепарирующую поверхность с помощью специальных генераторов импульсов.

В результате проведенных научных исследований получило дальнейшее развитие направление создания инновационного ресурсо- и экологосберегающего оборудования энергетических установок на основе градиентных технологий сепарации аэрозольных сред и разработана концепция многоуровневой сепарации путем комбинированного использования различных уровней технологий сепарации:

инерционной, турбофоретической, неизотермической и акустикофоретической, которая положена в его основу и реализация которой обеспечивает повышение эффективности очистки рабочих тел двигателей более 99 % от аэрозольных примесей размером менее 10 мкм за счет интенсификации процессов сепарации и, как следствие, улучшения технико-экономических и экологических показателей двигателей и энергетических установок.

Практическое значение полученных результатов заключается в разработке и создании эффективных, экологически чистых и ресурсосберегающих сепараторов на основе обобщенных многоуровневых градиентных сепарационных аэрозольных технологий и в разработке рекомендаций по проектированию их проточных частей.

Результаты работы получили внедрение в виде сепараторов для очистки: топливных газов от твердой и жидкой фракций, воздуха в машинном отделении судна, сжатого воздуха от жидких и твердых частиц для судового оборудования с высоким давлением, картерных газов двигателей внутреннего сгорания SP-10 сжатых газов энергосистем; систем: очистки воздуха от капельной влаги для технического кондиционирования помещений машинного отделения, контроля и разделения разнородных жидкостей (вода, масло и др.); технологий для системы очистки и разделения для водородного блока, измерения параметров среды и исследования сепараторов на опытном оборудовании в виде аэродинамических труб открытого типа; плоского и цилиндрического неизотермического сепараторов и акустикофоретического сепаратора для ГТД.

Ключевые слова: сепарация, градиент, аэрозоль, технология, энергетика, установка.

ABSTRACT

Ryzhkov S. S. Separation gradient aerosol technologies in power plants. – Manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences, Specialty 05.05.03 – Engines and Power Plants. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ministry of Education and Science of Ukraine, Mykolaiv, 2017.

The dissertation considers solving an important scientific and technical problem of creating generalized multilevel separation gradient aerosol technologies and their implementation in the innovative resource-saving and environment-friendly equipment of power plants.

The separation technologies and the devices employing them are able to perform purification from particles with the size exceeding 10 μm with the efficiency of 0.99. Purification of gaseous and liquid media from particles smaller than 10 μm is less effective and requires development of gas-purifying separation equipment able to capture particles of this size with implementation of resource-saving features of the plants by using the energy of the working medium.

The main aim of the development of design solutions for multilevel gradient aerosol technologies, as well as research of methods of their control, is their joint use in the presence of substantial gradients of the hydrodynamic and thermophysical parameters (temperature,

pressure, velocity, density, etc.) in the working system. The aim is achieved under the condition of sufficiency of substantial parameter gradients in the working media of engines and power plants and necessity of the presence of microaccumulators in aerosol media, as well as microgenerators or microtransformers of internal and external energies.

All the conditions are met at purification of aerosol media in the gradient fields of temperature, acoustic oscillations, concentrations and pulsations when they pass through multifunctional surfaces able to separate and coagulate. In the case of capturing aerosol particles, the positive effect of aerosol technology has been achieved with the help of the following three methods. The first method is to use the flow of energy of jet and tearing streams directly in the stream to coagulate particles in volume and on surfaces.

The second method is to direct the energy flows and their impact on the wall-adjacent and thermal layers of the surfaces of particles deposition with their coagulation. When using this method, gradient fields of temperature, acoustic oscillations or pulsations arise in the working channel. The temperature difference occurs due to cooling of the walls and coagulation surfaces of the working channel.

The third method is to create acoustic and electromagnetic pulse impacts on the flow and the separating surface with the use of special pulse generators.

As a result of the research, the direction for creating innovative resource-saving and environment-friendly equipment of power plants on the basis of gradient technologies of aerosol media separation has been further developed. The concept of multilevel separation has been elaborated through the combined use of different levels of separation technology: inertial, turbophoretic, non-isothermal and acoustophoretic. Its implementation provides an increase in the efficiency of purification of the working media of engines, which makes up over 99% of aerosol impurities smaller than 10 μm due to intensification of separation and, consequently, improvement of the technical, economic and environmental performance of engines and power plants.

The research results became the basis for the following scientific statements:

- creation of innovative power plants for ships, gas-pumping and heat power stations with improved technical, economic, environmental and operational parameters in a wide range of load variation is possible through the implementation of the separation equipment which makes use of multilevel separation gradient aerosol technologies; combining different methods as a set of separation processes and conditions, these technologies provide a flexible adaptation to the operating modes and working media of the appropriate power equipment;
- increasing the efficiency of purification of the working media of power plants, as well as fractional and integral indicators of their separation equipment, is achieved by multilevel purification of aerosol media by combining different levels of gradient separation technologies with the sequential or joint usage of the energy potential of the working medium flows (inertial, turbo- and diffusiphoretic separation) and external sources (non-isothermal and acoustophoretic separation);

– the required level of efficiency of purification of the working media of power plants depends on their operating modes, disperse composition of the working medium and appropriate equipment; it is achieved by joint application of different levels of gradient separation technologies (inertial, turbophoretic, non-isothermal and acoustophoretic) at gas velocities up to 20 m/s, aerosol particle size of 1...10 μm , and purification efficiency of not less than 0.99.

The practical significance of the research results resides in developing and creating efficient, environment-friendly and resource-saving separators based on generalized multilevel separation gradient aerosol technologies, as well as practical recommendations for the design of their flow channels.

The research results are implemented in the form of separators for purification of: fuel gases from solid and liquid fractions, air in the ship engine room, compressed air from liquid and solid particles in high-pressure marine equipment, crankcase gases of internal combustion engines, compressed gases of power systems; systems for air purification from droplet moisture for technical air conditioning of the engine room, systems for control and separation of heterogeneous liquid substances (water, oil, etc.); technologies for purification and separation systems for the hydrogen block, measurement of the medium parameters and study of the separators on testing equipment in the form of open-type aerodynamic tubes; flat and cylindrical thermophoretic separators and acoustophoretic separator for GTE.

Keywords: separation, gradient, aerosol, technology, power engineering, plant.