НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Рижков Сергій Сергійович

УДК 629.12.03

ДИСЕРТАЦІЯ СЕПАРАЦІЙНІ ГРАДІЄНТНІ АЕРОЗОЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант: Шевцов Анатолій Павлович, д-р техн. наук, професор

Миколаїв 2017

АНОТАЦІЯ

Рижков С. С. Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Науково-технічною проблемою, яка вирішується в дисертації, є створення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементація в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок.

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

Основні задачі наукового дослідження:

• виконати аналіз процесів перенесеня частинок у дисперсних багатофазних потоках енергетичних установок і виявити перспективні способи інтенсифікації процесів очищення за рахунок сил інерції, акустико-, турбофорезу, неізотермічних процесів та ін.;

• розробити узагальнену математичну модель процесів сепарації градієнтних аерозольних технологій та обґрунтувати методи дослідження;

розробити схеми узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій;

• 3D-моделюванням 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 експлуатації систем та пристроїв з інтенсифікацією процесів очищення в складі елементів і систем енергетичних установок.

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

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

У другому розділі обґрунтовані узагальнені багаторівневі системи й схеми градієнтних сепараційних аерозольних технологій та методи їх досліджень. Наведена узагальнена математична модель процесу сепарації аерозольних технологіях. Подані методи експериментального дослідження процесів сепарації аерозольних середовищ, опис і схеми експериментальних стендів для дослідження потоку методом голографічної інтерферометрії, досліджень очистки високодисперсних

аерозольних середовищ. Наведені методика проведення вимірювань та оцінка похибки вимірювань. Наприкінці розділу викладено методи узагальнення результатів дослідження градієнтних процесів перенесення при очищенні аерозольних середовищ.

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

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

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

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 технікоекономічних і екологічних показників двигунів та енергетичних установок.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Уперше метолами фізичного та математичного моделювання термоаеродинамічних i акустичних процесів багатофазних середовищ обгрунтовано підвищення інтенсивності очищення робочого тіла градієнтними сепараційними аерозольними технологіями та, як наслідок, поліпшення технікоекономічних показників двигунів та енергетичних установок за рахунок зменшення термічного й аеродинамічного опору на поверхнях елементів їх проточних частин унаслідок осадження аерозолю, а також скорочення викидів пари і мастила в навколишнє середовище.

2. Уперше обґрунтовано й реалізовано принцип багаторівневої сепарації частинок твердого і рідинного аерозолю 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; визначено параметри та умови ефективного застосування способів, зокрема швидкість і дисперсність дво- та багатофазних потоків робочих тіл; форма, розміри й орієнтація поверхонь осадження, **потенціалів** 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 із 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 та матеріальних ресурсів газотурбінних двигунів, двигунів внутрішнього згоряння й систем кондиціювання з поліпшенням їх екологічних показників, принципова новизна яких підтверджена патентами та заявками на винаходи.

5. Отримали подальший розвиток розробки методу 3D-проектування та дослідження систем та агрегатів двигунів й енергетичних установок: пневмосистем і систем картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, одно- та багатосекційних неізотермічних сепараторів газопаротурбінних установок, акустикофоретичних сепараторів та масловіддільників систем суфлювання газотурбінних двигунів, стиснутих газів енергосистем, суднових систем очищення повітря від краплинної вологи, які використовують технології інерційної та градієнтних 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 технікоекономічними, 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 та фракційних й 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- та 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 аерозолю 1…10 мкм, а також ефективності очищення не нижче 0,99.

Наукове значення роботи полягає у визначенні умов інтенсифікації процесів і розробці узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементації в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок з удосконаленням процесів очищення в сепараторах та їх фракційних й інтегральних показників.

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

Результати роботи впровадження

 Отримано акт упровадження результатів роботи у ДП НВКГ «Зоря»– «Машпроект» (Україна) згідно з господарським договором № 2077 від 01.06.2012/1875 на «Розробку сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-800 ($G = 400...800 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

2. Отримано акт упровадження результатів роботи у ПАТ «Завод «Екватор» згідно з договором про співпрацю.

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи:

- SPW 6,3 (*G* = 630...1600 м³/год);
- SPW 10,0 (*G* = 1000...2500 м³/год);
- SPW 16,0 (*G* = 1600...4000 м³/год);
- SPW 25,0 (*G* = 2500...6300 м³/год);
- SPW 40,0 $(G = 4000...10000 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 63,0 (*G* = 6300...16000 м³/год)

та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

3. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Batumi Navigation Teaching University LTD» (Грузія) на «Розробку суднового сепаратора для очистки повітря у машинному відділенні».

Згідно з актом упроваджено циліндричний неізотермічний сепаратор SP-100 (*G* = 10...140 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

4. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Georgian Veritas LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор стиснутих газів енергосистем** SP-100 (*G* = 50...100 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

5. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Marine technical service LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор стиснутих газів енергосистем** SP-200 (*G* = 100...200 м³/год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

6. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Sea service LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор стиснутих газів енергосистем** SP-400 (*G* = 200...400 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

7. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ДП ПКБ Чорноморсуднопроект» (Україна) на «Розробку систем очищення повітря від краплинної вологи для технічного кондиціонування приміщень машинного відділення».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPW 6,3 (*G* = 630...1600 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

8. Отримано акт упровадження результатів роботи у «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) згідно з контрактом № 03.2013/03 на «Розробку системи контролю та розділення різнорідних рідких речовин (вода, масло та ін.)».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPWS 63,0 ($G = 6300...16000 \text{ м}^3/год$) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

9. Отримано акт упровадження результатів роботи у «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) згідно з контрактом № 11/2014/1 на «Розробку водневої технології для системи очистки та розділення для водневого блока». Згідно з актом упроваджено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10 (G = 0,1...10,0 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

10. Отримано акт упровадження результатів роботи у «QUZHOU AISHANG INDUSTRIAL DESIGN CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10 (*G* = 0,1...10 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

11. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ZHEJIANG ACME INFO TECHNOLOGY CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем:

- SP-100 (*G* = 50...100 м³/год);
- SP-200 (*G* = 100...200 м³/год);
- SP-400 (*G* = 200...400 м³/год);
- SP-800 (*G* = 400...800 м³/год)

та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

12. Отримано акт упровадження результатів роботи у «SHENGZHOU ALENT ENTERPRISE MANAGMENT CONSULTING CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено плоский неізотермічний сепаратор SPT-500 (*G* = 190...500 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

13. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ZHEJIANG YUNDYNAMIC INVESTMENT MANAGMENT CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено циліндричний неізотермічний сепаратор SPT-140 (G = 10...140 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

14. Отримано акт упровадження результатів роботи у «QUZHOU MEICHUANG INSTRUMENT CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи:

• SPW 6,3 $(G = 63016)$	500 м ³ /год);
-------------------------	---------------------------

- SPW 10,0 (*G* = 1000...2500 м³/год);
- SPW 16,0 (*G* = 1600...4000 м³/год);
- SPW 25,0 $(G = 2500...6300 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 40,0 $(G = 4000...10000 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 63,0 $(G = 6300...16000 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 100,0 (*G* = 10000...16000 м³/год);
- SPW 1160 (*G* = 16000...25000 м³/год);
- SPW 1250,0 $(G = 25000...40000 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 1400,0 (*G* = 30000...40000 м³/год);
- SPWS 16,0 (*G* = 1600...4000 м³/год);
- SPWS 25,0 (*G* = 2500...6300 м³/год);

- SPWS 40,0 (*G* = 4000...10000 м³/год);
- SPWS 63,0 (*G* = 6300...16000 м³/год)

та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

15. Отримано акт упровадження результатів роботи у «SHENGZHOU SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATION SERVICE CENTER» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено акустикофоретичний сепаратор для ГТД:

- SPA-200 (*G* = 100...200 м³/год);
- SPA-400 (*G* = 400...800 м³/год)

та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 4 (GAFS) технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації.

16. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Jiangsu University of Science and Techology» (Китай) згідно з контрактом № 04.2016/01 на «Розробку системи вимірювань для дослідження турбулентної полідисперсної фази для аналізу технологій уловлювання у сепараційному обладнанні».

Згідно з актом упроваджено **технології вимірювання параметрів середовища** та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

Ключові слова: сепаратор, осадження аерозолів, сепараційні технології, технології інтенсифікації осадження.

SUMMARY

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 (Technical sciences). – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ministry of Education and Science of Ukraine, Mykolaiv, 2017.

The scientific and technical problem solved in the dissertation is the creation of generalized multilevel separation gradient aerosol technologies and their implementation in the innovative resource-saving and environment-friendly equipment of power plants.

<u>The research object</u> is the technologies for intensification of the separation processes in aerosol disperse media of the working fluids of power plants. <u>The research</u> <u>subject</u> is the purification processes in separators of power plants, their fractional and integral indicators.

The main objectives of the research are as follows:

• to analyze the processes of the particles transfer in disperse multiphase flows of power plants and to identify the promising ways of intensification of the purification processes by means of inertia forces, acoustophoresis, turbophoresis, non-isothermal processes, etc.;

• to develop a generalized mathematical model of separation according to the gradient aerosol technologies and to substantiate the research methods;

• to develop schemes of generalized multilevel separation gradient aerosol technologies;

• to investigate the patterns present in the processes of the particles transfer in disperse multiphase flows and separation equipment by means of 3D modeling on the basis of advanced application packages and numerical calculation methods;

• to substantiate the improvement of energy-saving and environmental indicators at intensification of the purification processes by means of experimental methods of real-time holographic interferometry, optical measurement of dispersity, phase concentration and contact interaction;

• to substantiate the methodology of generalization of the results of the study of the gradient transfer processes during purification of aerosol media;

• to provide scientific substantiation of the creation of innovative purification technologies and appropriate devices for available and prospective power plants;

• to prove reliability of the obtained scientific statements with the help of the results of operation of the systems and devices with intensification of the purification processes included to the elements and systems of power plants.

The **introduction** of the dissertation presents substantiation of the relevance of the topic and relation of the work to scientific programs and themes. The research object and subject are formulated, as and so are the research aim, main objectives and methods. Reliability of the obtained results and conclusions is substantiated along with the work's scientific novelty and practical significance. The completeness of presentation of obtained results is reflected in the list of publications and the level of approbation of the research at conferences.

Chapter 1 considers the basics of separation of aerosol media in power plants and analyzes the particles transfer in the gradient fields of pressure, pulsations, temperatures, acoustic oscillations. There are given advanced separation technologies for purifying aerosol media in power plants. The research aim is substantiated and the research objectives are set.

In **Chapter 2**, generalized multilevel systems and schemes of separation gradient aerosol technologies are substantiated, as well as the methods for their research. The generalized mathematical model of separation according to aerosol technologies is presented. The chapter also presents the methods of experimental study of the processes of separation of aerosol media, description and scheme of the experimental stands for the study of flow with the method of holographic interferometry, the study of separators for aerosols with increased concentration of the liquid phase, the study on purification of highly disperse aerosol media. The methods for measurement and estimation of the measurement error are provided as well. At the end of the chapter, there is a description of the methods for generalizing the results of the study of the gradient transfer processes during purification of aerosol media. **Chapter 3** renders the results of the research of inertial and turbophoretic levels of gradient aerosol technologies. For this purpose, circumference of the holographic interferometry surfaces and multifunctional deposition surfaces with the jets has been investigated in real time through visualization of the processes of circumference of the surfaces with the jet flow.

Chapter 4 introduces the special features of the common non-isothermal and acoustophoretic levels of gradient aerosol technologies were determined. The results of the study of the separation characteristics of acoustophoretic and acoustic non-isothermal technology in the multifunctional channel surfaces are obtained.

Chapter 5 considers application of 3D modeling for studying separators based on multilevel gradient aerosol technologies. The research results are introduced to power plants. The modeling results are taken as a basis for developing design schemes and recommendations for the construction of disperse media purification devices for environment-friendly and efficient power plants. These include separators for pneumatic systems and crankcase gases of internal combustion engines, single-sectional and multi-sectional non-isothermal separators for power plants, multistage flat acoustophoretic separators, acoustophoretic separator module, etc.

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 μ m due to intensification of separation and, consequently, improvement of the technical, economic and environmental performance of engines and power plants.

The scientific novelty of the research results is given below.

1. For the first time ever, the methods of physical and mathematical modeling of thermoaerodynamic and acoustic processes of multiphase media have been used to substantiate an increase in the intensity of purification of the working medium by means of gradient separation aerosol technologies and, consequently, improvement of the technical and economic performance of engines and power plants through the reduction of the thermal and aerodynamic resistance on the surfaces of the elements of their flow channels due to aerosol deposition, as well as reduction of steam and grease emissions into the environment.

2. For the first time ever, there has been substantiated and implemented a principle of multilevel separation of the particles of solid and liquid aerosol of the working media of engines and power plants with the particle size ranging from 1 to 10 μ m. It is realized by means of combined application of different gradient separation methods with their sequential or joint usage depending on the composition of the working medium and the corresponding power equipment.

3. For the first time ever, the methods of rational organization of the processes with different **mechanisms** of aerosol media separation have been developed and implemented in multilevel technologies for purification of the working media in engines and power plants. The parameters and conditions for effective application of these methods have been determined. In particular, they include the speed and dispersity of two- and multiphase flows of working media, the shape, size and orientation of deposition surfaces, the **potentials** of thermoaerodynamic and acoustic fields, flow divergence, etc. There are also outlined the **conditions for the formation of deposition areas**, at which the particles of the captured liquid phase are consolidated and it is removed without secondary extraction into the flow. These conditions provide an increase in the capture factor from 50 to 80 % due to intensification of the separation processes through the use of different technologies: inertial, turbophoretic, non-isothermal and acoustophoretic.

4. Further elaborated are the development and research of design solutions (design schemes and recommendations for the construction of elements) for improving the efficiency of complex energy and material conservation in gas turbine engines, internal combustion engines and air conditioning systems with enhancement of their environmental indicators, whose fundamental novelty is confirmed by the patents and claims for inventions.

5. Further elaborated is the method for 3D designing and studying of the systems and assemblies of engines and power plants, namely: pneumatic systems and crankcase gas systems of internal combustion engines, single- and multi-sectional non-isothermal separators of gas turbine units, acoustophoretic separators and oil separators of gas turbine engine stifling systems, compressed gases of power systems, ship systems of air purification from droplet moisture. They employ the inertial and gradient technologies of turbophoretic, non-isothermal and acoustophoretic separation.

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 multi-level 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 diffusiophoretic 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 μ m, and purification efficiency of not less than 0.99.

The scientific significance of the work resides in determining the conditions for intensification of the processes, developing generalized multilevel separation gradient aerosol technologies and implementing them in the innovative resource-saving and environment-friendly equipment of power plants with the improvement of purification in separators, their fractional and integral indicators.

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.

Implementation results

1. Act of implementation of the research results at the State Enterprise "Zorya-Mashproekt Gas Turbine Research and Development Complex" (Ukraine) under economic agreement No. 2077 dated 01.06.2012/1875 for "Development of a separator for primary purification of fuel gases from solid and liquid fractions".

According to the act, the **separator of compressed gases of power systems** SP-800 ($G = 400...800 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

2. Act of implementation of the research results at PJSC "Zavod Ekvator under cooperation agreement.

According to the act, the **system of air purification from droplet moisture** is introduced:

- SPW 6.3 $(G = 630...1600 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 10.0 $(G = 1000...2500 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 16.0 $(G = 1600...4000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 25.0 $(G = 2500...6300 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 40.0 $(G = 4000...10000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 63.0 $(G = 6300...16000 \text{ m}^3/\text{h})$

The following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

3. Act of implementation of the research results at Batumi Navigation Teaching University LTD (Georgia) for "Development of a ship separator for air purification in the engine room".

According to the act, the **cylindrical non-isothermal separator** SP-100 (G = 10 ... 140 m³/h) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation;
- Level 3 (GTFS) gradient non-isothermal separation.

4. Act of implementation of the research results at Georgian Veritas LTD (Georgia) for "Development of a separator for the purification of compressed air from liquid and solid particles for high pressure vessel equipment".

According to the act, the **separator of compressed gases of power systems** SP-100 ($G = 50...100 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

5. Act of implementation of the research results at Marine Technical Service LTD (Georgia) for "Development of a separator for purification of compressed air from liquid and solid particles in high-pressure ship equipment".

According to the act, the **separator of compressed gases of power systems** SP-200 ($G = 100...200 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

6. Act of implementation of the research results at Sea Service LTD (Georgia) for "Development of a separator for purification of compressed air from liquid and solid particles in high-pressure ship equipment".

According to the act, the **separator of compressed gases of power systems** SP-400 ($G = 200...400 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

7. Act of implementation of the research results at the State Enterprise "Design Bureau Chernomorsudnoproekt" (Ukraine) for "Development of systems for air purification from droplet moisture for technical air conditioning of the engine room".

According to the act, the **system of air purification from droplet moisture** SPW 6.3 ($G = 630...1600 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

8. Act of implementation of the research results at the China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering (China) under contract No. 03.2013/03 for "Development of a system for control and separation of heterogeneous liquid substances (water, oil, etc.)".

According to the act, the **system of air purification from droplet moisture** SPWS 63.0 ($G = 6300...16000 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

9. Act of implementation of the research results at China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering (China) under contract No. 11/2014/1 for "Development of hydrogen technology for a purification and separation system for a hydrogen block".

According to the act, the **separator of crankcase gases of internal combustion** engines SP-10 ($G = 0.1...10.0 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

10. Act of implementation of the research results at QUZHOU AISHANG INDUSTRIAL DESIGN CO LTD (China) under the technical agreement for "Separation gradient aerosol technologies in power plants".

According to the act, the **separator of crankcase gases of internal combustion** engines SP-10 ($G = 0.1 \dots 10 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

• Level 1 (INS) – inertial separation;

• Level 2 (GTUS) – gradient turbophoretic separation.

11. Act of implementation of the research results at ZHEJIANG ACME INFO TECHNOLOGY CO LTD (China) under the technical agreement on "Separation gradient aerosol technologies in power plants".

According to the act, the **separator of compressed gases of power systems** is introduced:

- SP-100 ($G = 50...100 \text{ m}^3/\text{h}$);
- SP-200 ($G = 100...200 \text{ m}^3/\text{h}$);
- SP-400 ($G = 200...400 \text{ m}^3/\text{h}$);
- SP-800 ($G = 400...800 \text{ m}^3/\text{h}$).

The following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

12. Act of implementation of the research results at SHENGZHOU ALENT ENTERPRISE MANAGMENT CONSULTING CO LTD (China) under the technical agreement on "Separation gradient aerosol technologies in power plants".

According to the act, a **flat non-isothermal separator** SPT-500 (G = 190...500 m³/h) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation;
- Level 3 (GTFS) gradient non-isothermal separation.

13. Act of implementation of the research results at ZHEJIANG YUNDYNAMIC INVESTMENT MANAGMENT CO LTD (China) under the technical agreement on "Separation gradient aerosol technologies in power plants".

According to the act, a **cylindrical non-isothermal separator** SPT-140 ($G = 10...140 \text{ m}^3/\text{h}$) is introduced and the following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation;
- Level 3 (GTFS) gradient non-isothermal separation.

14. Act of implementation of the research results at QUZHOU MEICHUANG INSTRUMENT CO LTD (China) under the technical agreement on "Separation gradient aerosol technologies in power plants".

According to the act, a **system of air purification from droplet moisture** is introduced:

• SPW 6.3 ($G = 6301600 \text{ m}^3/\text{h}$;
-------------	--------------------------------------

- SPW 10.0 $(G = 1000...2500 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 16.0 $(G = 1600...4000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 25.0 $(G = 2500...6300 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 40.0 $(G = 4000...10000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 63.0 $(G = 6300...16000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 100.0 $(G = 10000...16000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 1160 $(G = 16000...25000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 1250.0 $(G = 25000...40000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPW 1400.0 $(G = 30000...40000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPWS 16.0 $(G = 1600...4000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPWS 25.0 $(G = 2500...6300 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPWS 40.0 $(G = 4000...10000 \text{ m}^3/\text{h});$
- SPWS 63.0 $(G = 6300...16000 \text{ m}^3/\text{h}).$

The following technologies are used:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation.

15. Act of implementation of the research results at SHENGZHOU SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATION SERVICE CENTER (China) under the technical agreement on "Separation gradient aerosol technologies in power plants".

According to the act, an acoustic-phosphoric separator for the GTD was introduced:

- SPA-200 ($G = 100...200 \text{ m}^3/\text{h}$);
- SP-400 ($G = 400...800 \text{ m}^3/\text{h}$)

The following technologies are applied:

- Level 1 (INS) inertial separation;
- Level 2 (GTUS) gradient turbophoretic separation;
- Level 4 (GAFS) gradient acoustophoretic separation.

16. Act of implementation of the research results at at Jiangsu University of Science and Technology (China) under contract No. 04.2016 / 01 on "Development of the measurement system for the study of the turbulent polydisperse phase for the analysis of capturing technologies in separation equipment".

According to the act, there are introduced **technologies for measuring the parameters of the environment** and studying separators on the experimental equipment in the form of open-air aerodynamic pipes.

Keywords: separator, deposition of aerosols, separation technologies, technologies of deposition intensification.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ Статті у наукових фахових виданнях

 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 одиничного 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 високодисперсних 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 – BIHITI PAH, Ulrich's Periodicals Directory.

Автор розробив експерементальну 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 еходить 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 нестаціонарні задачі в інтервалі заданого часу.

9. Рижков С. С. Інтенсифікація осадження високодисперсних частинок у лабіринтному 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 лабіринтних 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 и₀ = 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 еходить 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).

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 MHБ – 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 примежових 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. – \mathbb{N} 4. – С. 53–60. Видання еходить 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. – N_{2} 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 м³/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. – \mathbb{N} 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 MHБ – 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. – № и 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. – № и 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. – № и 2015 04079 ; заявл. 27.04.2015 ; опубл. 25.11.15. – Бюл. № 22. – 4 с.

31. Пат. 114207 Україна, МПК В01D 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. – № и 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 // Муніципальна енергетика: проблеми, рішення : матеріали ІІ Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. – С. 69–72.

Автор розробив теплофізичну модель, яка являє собою транспорте 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. Рижков // Муніципальна енергетика: проблеми, рішення : матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. – С. 110–112.

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

34. Рыжков С. С. Верификация результатов расчета гидродинамических процессов однофазных газовых потоков с помощью метода голографической интерферометрии [Текст] / С. С. Рыжков // Суднова енергетика: 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 // Суднова енергетика: 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 [Teкст] / 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 І 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 неизотермических 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 // Проблеми 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 EOM.

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

46. Рыжков С. С. Експериментальний 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, дифузіофоретичних 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 [Teкct] / 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 турбоімпактного сепратора багатофазних 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 тетраедних 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 турбоімпактного 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 турбоімпактого сепаратора у пакетному модулі Ansys Icem 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 турбоімпактному сепараторі з радіальним коагуляційним елементом.

61. Рижков С. С. Дослідження турбоімпактного 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 турбоімпактного 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. Рижков, 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.

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 (з них 8 – без співавторів); публікацій у міжнародних журналах – 1 (без співавторів); доповідей на міжнародних конференціях – 42 (з них 10 – без співавторів); авторських свідоцтв – 4 (з них 3 – без співавторів).

Відомості про апробацію результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи доповідалися й одержали позитивну оцінку на Міжнародних і Всеукраїнських конференціях.

Міжнародні конференції

1. Jiangsu, China–2017. Cooperation Symposium for Top Univercities and Institutes, 2017 (Nanjing, China). Topic of report: Separation gradient aerosol technologies in energy installations : http://en.cittc.org.

2. The 5 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2016 (Nanjing, China). Topic of report: Separator of crankcase gases of internal combustion engines : http://en.cittc.org.

3. The 4 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2014 (Nanjing, China). Topic of report: Separators of compressed gases of power systems : http://en.cittc.org.

4. The 3 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2013 (Nanjing, China). Topic of report: Flat Thermophoretic Separator SPT-140 for $G = 10...140 \text{ m}^3/\text{h}$: http://en.cittc.org.

5. The 2 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2012 (Nanjing, China). Topic of report: Systems of air separation and cleaning from humidity water drops : http://en.cittc.org.

6. The 1 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2011 (Nanjing, China). Topic of report: Acoustico-phoretic Separator SPA-200 for $G = 100...200 \text{ m}^3/\text{h}$: http://en.cittc.org.

7. Visualization in Science and Education – Gordon Research Conference, 2007, Jul 1–6, Bryant University. Topic of report: Turbulent flows visualization with the help of holographic interferometry method and verification of received results due to physical process modeling : http://grc.org.

8. Granular and Granular-Fluid Flow – Gordon Research Conference, 2008, Jun 22–27. Topic of report: Fluid flow research in the processes of the particles catching intensification due to the thermal effects : http://grc.org.

Конференції України: II Науково-технічна конференція (НТК) «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (м. Миколаїв, НУК, 2007 р.); III Міжнародна науковотехнічна конференція (МНТК) для студентів, аспірантів, науковців та фахівців «Суднова енергетика: стан та проблеми» (м. Миколаїв, НУК, 2007 р.); I МНТК «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації» (м. Миколаїв, НУК, 2008 р.); МНТК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, НУК, 2010–2016 рр.); МНТК «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (м. Миколаїв, НУК, 2012–2016 рр.).

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, полягає в створенні узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементації в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок за допомогою пакетів обчислювальної гідродинаміки в двовимірній та тривимірній постановці, результатах теоретичних розрахунків процесів осадження полідисперсних частинок у сепараторах, проведенні стендових випробувань та аналізі результатів експериментальних досліджень сепараторів з використанням багаторівненвих технологій сепарації. Основні теоретичних наукові результати та експериментальних досліджень отримані автором особисто.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків і 6 додатків. У додатках наведені акти та інші матеріали, що

підтверджують упровадження результатів досліджень. Обсяг дисертації складає 424 сторінок, у т. ч. 270 сторінок основного машинописного тексту, 120 рисунків (на 108 сторінках), 56 таблиць (на 43 сторінках). Список використаних джерел містить 179 найменувань (на 21 сторінці). Додатки розміщені на 68 сторінках.

3MICT

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ					
ВСТУП					
РОЗДІЛ 1 ОСНОВИ СЕПАРАЦІЇ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ В					
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ					
1.1 Актуальність проблеми очищення аерозольних середовищ в	64				
енергетичних установках					
1.2 Перенесення частинок у градієнтних полях тисків, пульсацій,	67				
температур, акустичних коливань в аерозольних технологіях					
1.3 Аналіз сучасних сепараційних технологій очистки аерозольних	80				
середовищ для енергетичних установок					
1.4 Обгрунтування мети і постановка завдань досліджень					
Висновки по розділу 1	105				
РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ БАГАТОРІВНЕВОЇ	106				
СИСТЕМИ Й СХЕМ ГРАДІЄНТНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ					
АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ					
2.1 Розробка узагальненої багаторівневої системи та схем градієнтних 10					
сепараційних аерозольних технологій					
2.2 Узагальнена математична модель процесу сепарації аерозольних	117				
технологій. Теоретичні методи досліджень					
2.3 Методи експериментальних досліджень сепараційних аерозольних 13					
технологій					
2.4 Методика проведення вимірювань. Оцінка похибки вимірювань					
Висновки по розділу 2					
РОЗДІЛ З ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЕРЦІЙНОГО І ТУРБОФОРЕТИЧНОГО					
РІВНІВ ГРАДІЄНТНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ					

3.1 Візуалізація технологічних процесів обтікання струминним потоком
 151 поверхонь за допомогою голографічної інтерферометрії в реальному
 часі

3.2 Дослідження технологічних характеристик обтікання поверхонь 155 струменями

3.3 Дослідження технологічних сепараційних характеристик168у каналах з викривленими поверхнями

3.4 Дослідження гідродинамічних технологій турбофоретичної 14 сепарації в багатофункціональних поверхнях осадження
 Висновки по розділу 3
 177

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕІЗОТЕРМІЧНОГО ТА АКУСТИКО- 179 ФОРЕТИЧНОГО РІВНІВ ГРАДІЄНТНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

4.1 Дослідження сепараційних неізотермічних технологій багато 179
 функціональних поверхонь за допомогою голографічної
 інтерферометрії в реальному часі

4.2 Дослідження сепараційних характеристик акустикофоретичної 187 технології в багатофункціональних поверхнях каналів

4.3 Дослідження сепараційних характеристик акустиконеізотермічної 226 градієнтної технології в багатофункціональних поверхнях каналів

Висновки по розділу 4

244

РОЗДІЛ 5 ЗД-МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СЕПАРАТОРІВ247НА ОСНОВІ БАГАТОРІВНЕВИХ ГРАДІЄНТНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ247ТЕХНОЛОГІЙ. УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ247

5.1 Конструктивні схеми та рекомендації з побудови пристроїв 247 очищення дисперсних середовищ для екологічних і економічних енергетичних установок

5.2 3D-моделювання та дослідження сепараторів картерних газів 258

двигунів внутрішнього згоряння

5.3 3D-моделювання та дослідження сепараторів стиснутих газів	264			
енергосистем				
5.4 3D-моделювання та дослідження плоских неізотермічних	273			
градієнтних сепараторів газу				
5.5 3D-моделювання та дослідження циліндричних неізотермічних	279			
градієнтних сепараторів газу енергетичних установок				
5.6 3D-моделювання та дослідження суднових систем очищення повітря				
від краплинної вологи				
5.7 3D-моделювання та дослідження масловіддільників систем	293			
суфлювання газотурбінних двигунів 4-го покоління				
5.8 Упровадження результатів роботи				
Висновки по розділу 5				
ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ				
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ				

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ІНДЕКСИ, БЕЗРОЗМІРНІ ВЕЛИЧИНИ, СКОРОЧЕННЯ

- *d* діаметр, характерний розмір, м;
- *F* сила, Н;
- *G* витрата, кг/с;
- \vec{g} прискорення вільного падіння, м/с²;
- K кінетична енергія турбулентності, м²/c²;
- р тиск, Па;
- *R* універсальна газова стала, кДж/кмоль;
- Re-число Рейнольдса;
- St число Стокса;
- *T*-температура, К;
- и швидкість, м/с;
- ρ масова густина, кг/м³;
- ε дисипація кінетичної енергії турбулентності, м²/c³;
- τ-час, с;
- σ-число Прандтля;
- η коефіцієнт уловлювання;
- 0-початковий;
- кр критичний;
- min мінімальний;
- ГТД газотурбінний двигун;
- ГТУ газотурбінна установка;
- ГПТУ газопаротурбінна установка;
- ЕУ енергетична установка.

ВСТУП

У даний час спостерігається підвищений інтерес до вивчення аерозольних середовищ енергетичних установок. Фактично аерозольні середовища являють собою суміш рідкої чи твердої фази – дисперсійної складової та газової дисперсної фази, що дозволяє їх віднести до дво- чи багатофазних.

Актуальність проблеми розділення (сепарації) фаз пояснюється зростаючим значенням аерозольних середовищ у процесах перетворення та отримання енергії в енергетиці, технологічних процесах хімічної і нафтогазової промисловостей та ін. Двофазні газові середовища характеризуються різноманіттям форм руху, обміну енергією і масою. Робочі тіла новітніх газотурбінних двигунів (ГТД), що працюють як за відкритим, так і закритим газовими циклами, по суті є дисперсними двофазними середовищами підвищеного тиску [9]. У газотурбінних установках (ГТУ) утворення двофазних робочих газових середовищ відбувається на початковій стадії робочих процесів безпосередньо в камерах згоряння при диспергуванні палива, а потім і в ході складних ланцюгових реакцій горіння, що супроводжуються виникненням твердого вуглецю та ін. [3, 4].

Аерозольні середовища різні за походженням, складом та параметрами, вони є джерелами високо- й низькопотенційної енергії та, в ряді випадків, і дорогих матеріалів. Підвищення якості очищення газів дозволяє не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища, а й знизити споживання палива утилізацією низькопотенційної енергії газових викидів, скоротити втрати цінних матеріалів. У новому поколінні сепараційних газоочисних пристроїв необхідно розширювати матеріалозберігаючі функції, а також застосовувати «непридатні» раніше енергоресурси газових викидів для цілей очищення. Підвищеними потенційними можливостями в цьому напрямку відзначаються газові середовища для ГТД, як стаціонарних, так і суднових, – від робочого повітря на вході в ГТД до випускних газів, а також масляні аерозолі систем суфлювання ГТД [13]. Для систем суфлювання ГТУ як відкритого, так і замкнутого циклів доцільно використовувати масловіддільники-сепаратори, що забезпечують уловлювання дрібних краплинок масла і повернення їх у систему [140].

У цьому випадку знижуються не тільки викиди в атмосферу, але і втрати масла. [92]. Упровадження енергетичних установок нових поколінь – газо- і газопаротурбінних, а також атомних, зростання загальної кількості енергетичних установок та розвиток виробництва підвищують інтерес до проблем очистки аерозольних середовищ [18, 22].

Особливо гостро постала проблема очищення газів від рідкої фази, оскільки при її підвищених концентраціях знижуються економічність, довговічність, а також погіршуються експлуатаційні якості енергетичних установок. Створення високоефективних та економічних сепаруючих пристроїв є значним резервом поліпшення ефективності використання паливо-енергетичних ресурсів та підвищення надійності експлуатації ГТУ [34, 35].

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 [64].

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 закордоном: Інститут теплообміну (Білорусь); General Electric Company (США); Siemens Westinghouse (Німеччина); Вritish Gas (Великобританія).

Результати досліджень із зазначеної проблематики наведено в роботах зарубіжних і вітчизняних учених: В. Страуса, П. Райста, С.В. Рижкова, С.С. Рижкова, С.І. Сербіна, А.П. Шевцова, В.А. Голікова, Г.М. Гордона та ін. [6, 8, 20, 21, 23, 26, 34, 35, 64, 74, 75, 85, 87, 96, 100, 124].

Удосконалення двигунів і енергетичних установок пов'язано зі зростанням їх економічності та надійності, а також зниженням їх маси і габаритів. Це досягається підвищенням початкових параметрів термодинамічних циклів, застосуванням регенерації та утилізації теплоти робочого тіла, нових матеріалів, видів палива і мастила [17].

Використання оточуючого повітря як основи робочого тіла теплових двигунів потребує його очистки від різноманітних дисперсних включень рідкої і твердої фаз до показників, які задані експлуатаційними вимогами [25]. Початкові показники дисперсності включень характеризуються розмірами фракцій від одиниці до декілька сотень мікрон [1].

Робоче тіло містить також продукти згоряння рідких і газоподібних палив. Рідкі вуглеводні палива крім горючих компонентів містять і негорючі включення різного хімічного складу в рідкому й твердому станах.

У теперішній час мають місце сепараційні технології і пристрої, що їх реалізують, які здатні робити очистку від частинок розміром більше 10 мкм з ефективністю не менше 0,99. Очистка газових і рідких середовищ від частинок менше 10 мкм менш ефективна і потребує розробки газоочисного сепараційного устаткування, здатного уловлювати частинки таких розмірів і застосовувати ресурсозберігаючі можливості самих установок за рахунок використання енергії робочого тіла. Розробка такого устаткування потребує знань закономірностей інтенсифікації як окремих технологічних процесів очистки так і їх сукупностей в залежності від послідовності. Тому дослідження таких закономірностей є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана автором у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК ім. адм. Макарова) у рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні. Виконано 15 науководослідних робіт (НДР) за такими напрямками:

1. НДР № 2088 № держ. реєстрації 0117U000350 – «Розробка

аерозольних градієнтних технологій для систем життєзабезпечення суден і кораблів». Замовник – МОН України.

Упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-400 (G = 200...400 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

 НДР № 1667 № держ. реєстрації 0109U002930 – «Розробка та виготовлення високоефективного малогабаритного масловіддільника». Замовник – XICKT, Китай.

Упроваджено акустикофоретичний сепаратор для ГТД SPA-400 ($G = 400...800 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

- рівень № 4 (GAFS) – технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації.

3. НДР № 1894 № держ. реєстрації 0113U000241 – «Основи турбоімпактної інтенсифікаці процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищенного тиску для енергетичних установок». Замовник – МОН України.

Упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-800 ($G = 400...800 \text{ м}^3$ /год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) - технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

4. НДР № 1992 № держ. реєстрації 0115U000303 – «Розробка екологічно безпечної технології та створення експериментальної автоматизованої установки безперервного піролізу цілих зношених автошин з одержанням альтернативних палив». Замовник – МОН України.

Упроваджено плоский неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-500 ($G = 190...500 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

- рівень № 3 (GTFS) – технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

5. НДР № 1918 – «Розробка суднової мультифункціональної системи віддаленого контролю рівня і вимірювання рідини з підсистемою оповіщення» Nantong Haishi Ship Machinery Co., Ltd.

Упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPWS 63,0 ($G = 6300...16000 \text{ м}^3$ /год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

6. НДР № 1842 № держ. реєстрації 0111U009084 – «Розрбка екологічно безпечної технології екопіролізу для утилізації органічних відходів та низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального». Замовник – МОН України.

Упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 ($G = 10...140 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

– рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

- рівень № 3 (GTFS) – технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

7. НДР № 1875 – «Розробка сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій». Замовник – ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект».

Упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-800 ($G = 400...800 \text{ м}^3$ /год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

8. НДР № 1810 № держ. реєстрації 0111U002310 – «Наукові основи енергозберігаючого двостадійного процесу термічної утилізації органічної частини твердих побутових відходів». Замовник – МОН України.

Упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 ($G = 10...140 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

- рівень № 3 (GTFS) – технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

9. НДР № 1764 № держ. реєстрації 0110U001322 – «Основи інтенсифікації ультратурбофоретичного переносу високодисперсної фази при розділенні двофазних середовищ». Замовник – МОН України.

Упроваджено акустикофоретичний сепаратор для ГТД:

- SPA-200 (*G* = 100...200 м³/год);

- SPA-400 (*G* = 400...800 м³/год)

та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 4 (GAFS) технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації.

10. НДР № 1744 № держ. реєстрації 0109U007601 – «Розроблення новітньої технології переробки органічних відходів методом багатоконтурного піролізу з отримуванням альтернативного палива». Замовник – МОН України.

Упроваджено плоский неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-500 ($G = 190...500 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

11. НДР № 1623, № держ. реєстрації 0107U000711 – «Енергозбереження на основі інтенсифікації струминної утилізації та очищення газових викидів енергетичних установок». Замовник – МОН України.

Згідно з актом упроваджено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння

SP-10 ($G = 0, 1...10 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) - технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

12. НДР № 1666 № держ. реєстрації 0109U002928 – «Розробка стенда для досліджень масловіддільників». Замовник – ХІСКТ, Китай.

Згідно з актом упроваджено технології вимірювання параметрів середовища та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

13. НДР. КОНТРАКТ № 11.2014/01 – «Разработка солнечно-водородной металлогидридной установки». Замовник – Jiangsu University of Science and Technology.

Згідно з актом упроваджено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10 (G = 0,1...10 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

14. НДР. КОНТРАКТ № 11. 04/2016/1 – «Форматування та підготовка змісту книги «Теплотехнічні вимірюваня та прилади в суднових енергетичних установках». Замовник – Jiangsu University of Science and Technology.

Згідно з актом упроваджено технології вимірювання параметрів середовища та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

15. НДР № 1699, № держ. реєстрації 0103U001794 – «Дослідження та інтенсифікація процесів турботермофоретичного перенесення дисперсної фази при очищенні і розділенні робочих двофазних середовищ». Замовник – МОН України.

Упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 (*G* = 10...140 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

- рівень № 3 (GTFS) – технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

Мета дослідження – створення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементація в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок.

Завдання дослідження:

• виконати аналіз процесів перенесеня частинок у дисперсних багатофазних потоках енергетичних установок і виявити перспективні способи інтенсифікації процесів очищення за рахунок сил інерції, акустикофорезу, турбофорезу, неізотермічної градієнтної сепарації та ін.;

• розробити узагальнену математичну модель процесів сепарації градієнтних аерозольних технологій та обґрунтувати методи дослідження;

розробити схеми узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій;

• 3D-моделюванням 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 і пристроїв, що їх реалізують, для сучасних і перспективних енергетичних установок;

 довести достовірність отриманих наукових положень результатами експлуатації систем і пристроїв з інтенсифікацією процесів очищення в складі елементів і систем енергетичних установок.

Об'єкт дослідження – технології інтенсифікації процесів сепарації в аерозольних дисперсних середовищах.

Предмет 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 на основі технологій інтенсифікацій осадження здійснено за допомогою методу контрольного об'єму з використанням сучасного комплексу обчислювальної гідродинаміки. Експериментальні дослідження сепараторів для енергетичних систем та установок проведено в Національному університеті кораблебудування на спеціально створених стендах у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу з використанням лічильників частинок та фотометрів аерозолів; розрахунок концентрацій дисперсної фази здійснено ваговим методом за допомогою аналітичних фільтрів. При постановці дослідів використовувалася загальна теорія моделювання та планування експериментів, а при обробці даних та перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

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.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

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

2. Уперше обґрунтовано й реалізовано принцип багаторівневої сепарації частинок твердого і рідинного аерозолю 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; визначено параметри та умови ефективного застосування способів, зокрема швидкість і дисперсність дво- та багатофазних потоків робочих тіл; форма, розміри й орієнтація поверхонь осадження, **потенціалів** 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 із 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 та матеріальних ресурсів газотурбінних двигунів, двигунів внутрішнього згоряння й

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

5. Отримали подальший розвиток розробки методу 3D-проектування та дослідження систем та агрегатів двигунів й енергетичних установок: пневмосистем і систем картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, одно- та багатосекційних неізотермічних сепараторів газопаротурбінних установок, акустикофоретичних сепараторів та масловіддільників систем суфлювання газотурбінних двигунів, стиснутих газів енергосистем, суднових систем очищення повітря від краплинної вологи, які використовують технології інерційної та градієнтних 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 технікоекономічними, 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 та фракційних й 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- та 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 аерозолю 1…10 мкм, а також ефективності очищення не нижче 0,99.

Достовірність результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних методів і засобів, адекватністю прийнятих допущень теплофізичної моделі й реальних процесів, які відтворювалися на спеціальних стендах і вивчалися за допомогою сучасних засобів вимірювання неконтактного типу, задовільним узгодженням результатів розрахунків з експериментальними даними, а також результатами стендових та натурних випробувань. Отримані в роботі результати є логічними і не суперечать практиці проектування сепараторів газу для газотурбінних двигунів.

Наукове значення роботи полягає у визначенні умов інтенсифікації процесів і розробці узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементації в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок з удосконаленням процесів очищення в сепараторах та їх фракційних й інтегральних показників.

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

Результати роботи впровадження

Отримано 16 актів упровадження роботи.

1. Отримано акт упровадження результатів роботи у ДП НВКГ «Зоря»– «Машпроект» (Україна) згідно з господарським договором № 2077 від 01.06.2012/1875 «Розробка сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-800 ($G = 400...800 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

2. Отримано акт упровадження результатів роботи у ПАТ «Завод «Екватор» відповідно до договору про співпрацю.

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи:

—	SPW 6,3	(<i>G</i> = 6301600 м ³ /год);
_	SPW 10,0	(<i>G</i> = 1000500 м ³ /год);
_	SPW 16,0	(<i>G</i> = 16004000 м ³ /год);
—	SPW 25,0	(<i>G</i> = 25006300 м ³ /год);
_	SPW 40,0	(<i>G</i> = 400010000 м ³ /год)
—	SPW 63,0	(<i>G</i> = 6300-16000 м ³ /год)

та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

3. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Batumi Navigation Teaching University LTD» (Грузія) на «Розробку суднового сепаратора для очистки повітря у машинному відділенні».

Згідно з актом упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SP-100 (G = 10...140 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

4. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Georgian Veritas LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-100 ($G = 50...100 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

5. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Marine technical service LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-200 ($G = 100...200 \text{ м}^3$ /год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

6. Отримано акт упровадження результатів роботи у «2Sea service LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-400 ($G = 200...400 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

7. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ДП ПКБ Чорноморсуднопроект» (Україна) на «Розробку систем очищення повітря від краплинної вологи для технічного кондиціонування приміщень машинного відділення».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPW 6,3 ($G = 630...1600 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

8. Отримано акт упровадження результатів роботи у «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) згідно з контрактом № 03.2013/03 на «Розробку системи контролю та розділення різнородних рідких речовин (вода, масло та ін.)».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPWS 63,0 ($G = 6300...16000 \text{ м}^3/\text{год}$) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

9. Отримано акт упровадження результатів роботи у «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) згідно з контрактом № 11/2014/1 на «Розробку водневої технології для системи очистки та розділення для водневого блока».

Згідно з актом упроваджено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10 (G = 0,1...10 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

10. Отримано акт упровадження результатів роботи у «QUZHOU AISHANG INDUSTRIAL DESIGN CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10 (G = 0,1...10 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

11. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ZHEJIANG ACME INFO TECHNOLOGY CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем:

- SP-400 ($G = 200...400 \text{ м}^3/\text{год}$);
- SP-800 (*G* = 400...800 м³/год)

та використано наступні технології:

рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

12. Отримано акт упровадження результатів роботи у «SHENGZHOU ALENT ENTERPRISE MANAGMENT CONSULTING CO LTD» (Китай) згідно з технічною

угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено плоский неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-500 (*G* = 190...500 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

- рівень № 3 (GTFS) - технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

13. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ZHEJIANG YUNDYNAMIC INVESTMENT MANAGMENT CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 (*G* = 10...140 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

14. Отримано акт упровадження результатів роботи у «2QUZHOU MEICHUANG INSTRUMENT CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи:

_	SPW 6,3	(<i>G</i> = 6301600 м ³ /год);
_	SPW 10,0	(<i>G</i> = 10002500 м ³ /год);
_	SPW 16,0	(<i>G</i> = 16004000 м ³ /год);
_	SPW 25,0	(<i>G</i> = 25006300 м ³ /год);
_	SPW 40,0	(<i>G</i> = 400010000 м ³ /год);
_	SPW 63,0	(<i>G</i> = 630016000 м ³ /год);
_	SPW 100,0	(<i>G</i> = 1000016000 м ³ /год)
_	SPW 1160	(<i>G</i> = 1600025000 м ³ /год)
_	SPW 1250,0	(<i>G</i> = 2500040000 м ³ /год)
_	SPW 1400,0	(<i>G</i> = 3000040000 м ³ /год)
_	SPWS 16,0	(<i>G</i> = 16004000 м ³ /год);
_	SPWS 25,0	(<i>G</i> = 25006300 м ³ /год);

– SPWS 40,0 $(G = 4000...10000 \text{ м}^3/\text{год});$

– SPWS 63,0 ($G = 6300...16000 \text{ м}^3/год$)

та застосовано наступні технології:

рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

15. Отримано акт упровадження результатів роботи у «SHENGZHOU SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATION SERVICE CENTER» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено акустикофоретичний сепаратор для ГТД:

- SPA- 200 (*G* = 100...200 м³/год);

- SPA- 400 (*G* = 400...800 м³/год)

та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 4 (GAFS) тТехнологія градієнтної акустикофоретичної сепарації.

16. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Jiangsu University of Science and Techology» (Китай) згідно з контрактом № 04.2016/01 на «Розробку системи вимірювань для дослідження турбулентної полідисперсної фази для аналізу технологій уловлювання у сепараційному обладнанні».

Згідно з актом упроваджено технології вимірювання параметрів середовища та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

Особистий внесок здобувача полягає В створенні узагальнених аерозольних технологій багаторівневих градієнтних сепараційних та ïx імплементації в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок за допомогою пакетів обчислювальної гідродинаміки в двовимірній та тривимірній постановці, в результатах теоретичних розрахунків процесів осадження полідисперсних частинок у сепараторах, проведенні стендових випробувань та аналізі результатів експериментальних досліджень сепараторів з використанням багаторівневих технологій сепарації. Основні

наукові результати теоретичних та експериментальних досліджень отримані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Міжнародні конференції

1. Jiangsu, China–2017. Cooperation Symposium for Top Univercities and Institutes, 2017 (Nanjing, China). Topic of report: Separation gradient aerosol technologies in energy installations : http://en.cittc.org.

2. The 5 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2016 (Nanjing, China). Topic of report: Separator of crankcase gases of internal combustion engines : http://en.cittc.org.

3. The 4 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2014 (Nanjing, China). Topic of report: Separators of compressed gases of power systems : http://en.cittc.org.

4. The 3 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2013 (Nanjing, China). Topic of report: Flat Thermophoretic Separator SPT-140 for G = 10...140 m3/h : http://en.cittc.org.

5. The 2 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2012 (Nanjing, China). Topic of report: Systems of air separation and cleaning from humidity water drops : http://en.cittc.org.

6. The 1 th China Jiangsu Conference for International Technology Transfer and Commercialization (CITTC), 2011 (Nanjing, China). Topic of report: Acoustico-phoretic Separator SPA-200 for G = 100...200 m3/h : http://en.cittc.org.

7. Visualization in Science and Education – Gordon Research Conference, 2007, Jul 1–6, Bryant University. Topic of report: Turbulent flows visualization with the help of holographic interferometry method and verification of received results due to physical process modeling : http://grc.org.

8. Granular and Granular-Fluid Flow – Gordon Research Conference, 2008, Jun 22–27. Topic of report: Fluid flow research in the processes of the particles catching intensification due to the thermal effects : http://grc.org.

Конференції України: II Науково-технічна конференція (НТК) «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (м. Миколаїв, НУК, 2007 р.); III Міжнародна науково-технічна конференція (МНТК) для студентів, аспірантів, науковців та фахівців «Суднова енергетика: стан та проблеми» (м. Миколаїв, НУК, 2007 р.); I МНТК «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації» (м. Миколаїв, НУК, 2008 р.); МНТК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, НУК, 2010–2016 рр.); МНТК «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (м. Миколаїв, НУК, 2012–2016 рр.).

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 (з них 8 – без співавторів); публікацій у міжнародних журналах – 1 (без співавторів); доповідей на міжнародних конференціях – 42 (з них 10 – без співавторів); авторських свідоцтв – 4 (з них 3 – без співавторів).

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків і 6 додатків. У додатках наведені акти та інші матеріали, що підтверджують упровадження результатів досліджень. Обсяг дисертації складає 424 сторінок, у т. ч. 270 сторінок основного машинописного тексту, 120 рисунків (на 108 сторінках), 56 таблиць (на 43 сторінках). Список використаних джерел містить 179 найменувань (на 21 сторінці). Додатки розміщені на 68 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВИ СЕПАРАЦІЇ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

1.1 Актуальність проблеми очищення аерозольних середовищ в енергетичних установках

У даний час спостерігається підвищений інтерес до вивчення аерозольних середовищ енергетичних установок. Фактично аерозольні середовища являють собою суміш рідкої чи твердої фази – дисперсійної складової та газової дисперсної фази, що дозволяє їх віднести до дво- чи багатофазних [5].

Актуальність проблеми розділення (сепарації) фаз пояснюється зростаючим значенням аерозольних середовищ у процесах перетворення та отримання енергії в енергомашинобудуванні, хімічній і нафтогазовій промисловості та ін. Двофазні газові середовища характеризуються різноманіттям форм руху, обміну енергією і масою [24]. Робочі тіла новітніх газотурбінних двигунів (ГТД), що працюють як за відкритим, так і закритим газовими циклами, по суті є дисперсними двофазними середовищами підвищеного тиску. У газотурбінних установках (ГТУ) утворення двофазних робочих газових середовищ відбувається на початковій стадії робочих процесів безпосередньо в камерах згоряння при диспергуванні палива, а потім і в ході складних ланцюгових реакцій горіння, що супроводжуються виникненням твердого вуглецю та ін. [10, 66–69].

Аерозольні середовища різні за походженням, складом та параметрами, вони є джерелами високо- й низькопотенційної енергії та, в ряді випадків, і дорогих матеріалів. Підвищення якості очищення газів дозволяє не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища, а й знизити споживання палива утилізацією низькопотенційної енергії газових викидів, скоротити втрати цінних матеріалів [53]. У новому поколінні сепараційних газоочисних пристроїв необхідно розширювати матеріалозберігаючі функції, а також застосовувати «непридатні» раніше енергоресурси газових викидів для цілей очищення. Підвищеними потенційними можливостями в цьому напрямку відзначаються газові середовища для ГТД, як стаціонарних, так і суднових, – від робочого повітря на вході в ГТД до паливних та випускних газів, а також масляні аерозолі систем суфлювання ГТД [66–69]. Для систем суфлювання ГТУ як відкритого, так і замкнутого циклів доцільно використовувати масловіддільники-сепаратори, що забезпечують уловлювання дрібних краплинок масла і повернення їх у систему.

У цьому випадку знижуються не тільки викиди в атмосферу, але і втрати масла. Упровадження енергетичних установок нових поколінь – газо- і газопаротурбінних, а також атомних, зростання загальної кількості енергетичних установок та розвиток виробництва підвищують інтерес до проблем очистки аерозольних середовищ.

Особливо гостро постала проблема очищення газів від рідкої фази, оскільки при її підвищених концентраціях знижуються економічність, довговічність, а також погіршуються експлуатаційні якості енергетичних установок. Створення високоефективних та економічних сепаруючих пристроїв є значним резервом поліпшення ефективності використання паливо-енергетичних ресурсів та підвищення надійності експлуатації ГТУ [15].

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 [138].

Розглядом різних аспектів цієї проблеми займаються у багатьох університетах, проектних та конструкторських організаціях як у нас в Україні:

- ITT Φ HAHY;

– 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 закордоном:

- Інститут теплообміну (Білорусь);
- General Electric Company (CIIIA);
- Siemens Westinghouse (Німеччина);
- British Gas (Великобританія).

Результати досліджень із зазначеної проблематики наведено в роботах зарубіжних і вітчизняних учених: В. Страуса, П. Райста, С.В. Рижкова, С.С. Рижкова, С.І. Сербіна, А.П. Шевцова, В.А. Голікова, Г.М. Гордона та ін. [6, 8, 11, 20, 21, 23, 26, 34, 35, 75, 84, 86, 87, 125].

Удосконалення двигунів і енергетичних установок пов'язано зі зростанням їх економічності та надійності, а також зниженням їх маси і габаритів. Це досягається підвищенням початкових параметрів термодинамічних циклів, застосуванням регенерації та утилізації теплоти робочого тіла, нових матеріалів, видів палива і мастила.

Використання оточуючого повітря як основи робочого тіла теплових двигунів потребує його очистки від різноманітних дисперсних включень рідкої і твердої фаз до показників, які задані експлуатаційними вимогами. Початкові показники дисперсності включень характеризуються розмірами фракцій від одиниці до декілька сотень мікрон [1, 2].

Робоче тіло містить також продукти згоряння рідких і газоподібних палив. Рідкі вуглеводні палива крім горючих компонентів містять і негорючі включення різного хімічного складу в рідкому й твердому станах.

У теперішній час мають місце сепараційні технології і пристрої, що їх реалізують, які здатні робити очистку від частинок розміром більше 10 мкм з ефективністю не менше 0,99. Очистка газових і рідких середовищ від частинок менше 10 мкм менш ефективна і потребує розробки газоочисного сепараційного устаткування, здатного уловлювати частинки таких розмірів і застосовувати ресурсозберігаючі можливості самих установок за рахунок використання енергії робочого тіла [31–33, 65].

1.2 Перенесення частинок у градієнтних полях тисків, пульсацій, температур, акустичних коливань в аерозольних технологіях

1.2.1 Основи сепарації дисперсних двофазних середовищ

Для очищення аерозольних середовищ енергетичних установок використовуються наступні способи: інерційна сепарація і фільтрація.

Інерційна сепарація – це спосіб захоплення частинок при високих швидкостях їх руху на поверхнях поодиноких тіл. Полягає вона у тому, що частинка, яка рухається поблизу сепараційної поверхні тіла, внаслідок своєї інерції зміщується з лінії струму і прямує до її фронтальної поверхні (рис. 1.1).

Інерційна сепарація частинок не враховує їх осадження на задній поверхні тіла, яке може відбуватися за рахунок турбулентних пульсацій газового потоку [29].



Рисунок 1.1 – Лінії струменя руху частинки, що оточує циліндр, при досягненні його поверхні:

1 – частинка, осаджена за рахунок інерції; 2 – частинка, осаджена за рахунок ефекту дотику

Осадження крупних частинок відбувається при обтіканні перешкод під дією сил інерції [23]. При цьому вони рухаються не по викривленим поблизу перешкод лініях струменя газу, а перетинають їх, стикаючись із поверхнею, що викликає викривлення ліній струменя. Розбіжність у лініях струменя газу і траєкторіях аерозольних частинок посилюється у міру зростання їх інерційних якостей. Дрібні краплі належать до низькоінерційних і практично не осідають на перешкоді, оскільки їх траєкторії зливаються з лініями струменя газу [2, 12, 14].

Крупні аерозольні частинки не входять у пульсаційні та інші рухи, на них діє тільки аеродинамічна сила, якщо знехтувати гравітацією.

У дисперсних двофазних потоках відносний рух частинок з $d_k > 20$ мкм характеризується числами Рейнольдса більше $\text{Re}_k > 1$ і обтікання частинок виходить за межі дії закону Стокса. Коефіцієнт аеродинамічного опору частинки в інтервалі $\text{Re}_k 1...10^3$ описується емпіричною формулою [2, 5]

$$\varphi = 24 \operatorname{Re}_{k}^{-1} (1 + 0.17 \cdot \operatorname{Re}_{k}^{2/3}). \tag{1.1}$$

Рівняння руху частинки з урахуванням (1.1) можна записати у безрозмірному вигляді

$$\frac{\partial \overline{u}_k}{\partial \overline{\tau}} = \operatorname{St}^{-1} \left(1 + 0,17 \operatorname{Re}_k^{2/3} \right), \tag{1.2}$$

де $\bar{u}_k = u_k / u_0$ – безрозмірна осереднена швидкість частинки; u_0 – швидкість потоку, м/с; $\bar{\tau} = \tau u_0 / M$ – безрозмірний час; M – характерний розмір перешкоди; $St = \rho_k d_k^2 u_o / 18 \mu M$. – число Стокса.

У теорії сепарації газових потоків частинка вважається уловленою, якщо траєкторія її центру ваги перетинається з обтічної поверхнею. Оцінка ефективності елементів сепарації зводиться до розрахунку траєкторії частинок, що транспортуються потоком, та їх взаємодії з поверхнею елементів. При цьому вважається, що густина частинок набагато більша (на два-три порядки) від густини несучого газу [129].

Концентрація частинок (їх об'ємний вміст) у потоці така, що дозволяє знехтувати їх взаємодією і розглядати рух частинок незалежно один від одного.

Також вважається, що наявність частинок не впливає на характеристики газового потоку, а розширення потоку незначне.

Тому рух частинок можна розглядати як плоску задачу.

Проектуючи на осі X і Y, рівняння (1.2) виражається системою

$$\frac{\partial^2 \bar{X}_k}{\partial \bar{\tau}^2} = \operatorname{St}^{-1} \left(1 + 0, 17 \operatorname{Re}^{2/3} \right) \left(\bar{u}_x - \frac{\partial \bar{X}_k}{\partial \bar{\tau}} \right);$$

$$\frac{\partial^2 \bar{Y}_k}{\partial \bar{\tau}^2} = \operatorname{St}^{-1} \left(1 + 0, 17 \operatorname{Re}^{2/3} \right) \left(\bar{u}_y - \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\tau}} \right), \qquad (1.3)$$

де $\overline{X}_k = X_k/d_0$ та $\overline{Y}_k = Y_k/d_0$ – координати краплі в безрозмірному вигляді; d_0 – діаметр струменя, м; $\overline{u}_x = u_x/u_o$; $\overline{u}_y = u_y/u_o$ – безрозмірні швидкості газу [65].

У роботах [2, 3, 6, 7] аналогічні рівняння використані для дослідження обтікання двофазним середовищем циліндра, сфери, нескінченної пластини та ін. У роботах [8, 9, 10] вирішені завдання струминного обтікання пластини вісесиметричним двофазним середовищем.

За траєкторіями частинок d_{ki} визначаються коефіцієнти їх уловлювання:

$$\eta_i = 2R_{\rm mi}/d_{\rm o}\,,\tag{1.4}$$

де R_{rpi} – гранична траєкторія частинок з діаметром d_{ki} .

Під граничною розуміють траєкторію частинки, розташовану на такій відстані від осі потоку, при якому частинка ще дотикається перешкоди (пластини, сфери, циліндра та ін.).

Усі частинки, що знаходяться на радіусі до граничної траєкторії, тобто $R_i < R_{rpi}$, осідають на перешкоді, а частинки з $R_i > R_{rpi}$ несуться потоком без осадження. При полідисперсному складі частинок у двофазному середовищі сумарний коефіцієнт уловлювання визначиться як

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\Sigma \eta_i C_{mi}}{\Sigma C_{mi}},\tag{1.5}$$

де C_{mi} – масова концентрація частинок діаметром d_{ki} [79].

Багатьма дослідженнями встановлено існування критичного числа Стокса St_{кр}, при якому неможливе інерційне осадження частинок на перешкоді [2, 3, 6, 7, 11–17]. Критичні умови осадження аерозолів залежать від форми тіла, що взаємодіє із частинками, і властивостей несучого середовища.

За критичного значення числа Стокса можна для конкретної перешкоди визначити мінімальний діаметр частинок, що осаджуються на тілі, за наступною формулою:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18\mu \mathrm{St}_{sp} d_0}{\rho_k u_0}}$$
(1.6)

Частинки з d_{\min} припадають на лінію струменя газу, що проходить через поверхню перешкоди, з інших ліній струменя газу вони не осідають. Таким чином, St_{кр} – це критерій осадження найменших частинок на перешкоді в цілому.

Чим вище St_{кр}, тим більший розмір частинок, що не осаджуються на перешкоді за інших рівних умов.

Ефект осадження посилюється при збільшенні густини частинок, швидкості потоку і зменшенні характерного розміру (діаметра) перешкоди.

Згідно з роботою [76] при потенційному обтіканні потоком необмеженої плоскої пластини St_{кр} = 0,250.

Розрахунки за формулою (1.6) показують, що мінімальний діаметр крапель, які осаджуються при струминному обтіканні пластини, складає для швидкостей *u*₀, що дорівнюють 10, 20 і 30 м/с, відповідно 8,7; 6,14 і 5,0 мкм.

Для інтенсифікації інерційного осадження крупних частинок [138] необхідно прагнути до збільшення швидкості потоку, вибору перешкоди з мінімальним St_{кр}.

1.2.2 Перенесення частинок у градієнтних полях швидкостей, пульсацій тиску, температур, акустичних коливань

На осадження частинок також впливають пульсації тиску, температури, акустичні коливання (рис. 1.2) [135].



Рисунок 1.2 – Градієнтне перенесення частинок в аерозольному середовищі
У турбулентних потоках частинки здійснюють осереднений рух із середовищем і одночасно на них впливають їх невпорядковані турбулентні пульсації. У неізотермічних потоках додаються неізотермічні градієнти й інші сили [45, 160].

Ступінь захоплення частинок у безладне переміщення разом з молярними об'ємами середовища залежить від їх інерційних властивостей.

Для загального випадку миттєвого руху беруться наступні припущення.

Частинки сферичні, відстань між ними велика в порівнянні з їх діаметром, вони не взаємодіють одна з одною і не здійснюють вплив на турбулентність газового середовища.

Масштаб турбулентних мольних об'ємів набагато перевищує діаметр частинки *d*_ч, тому за період пульсацій кожна робить рух, залишаючись у межах вихідного моля. Цій умові відповідають частинки 0,01...10,0 мкм.

Обтікання частинки всередині моля носить в'язкий характер при числах Рейнольдса частинки менше одиниці:

$$\operatorname{Re}_{k} = \frac{d_{k}(u - u_{k})}{v} < 1, \tag{1.7}$$

де *и* і *u_k* – відповідно швидкості газу і частинки, м/с, v – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, м²/с [141].

Опір руху частинки в газоподібному середовищі описується законом Стокса

$$F_a = 3\pi\mu d_k \left(u - u_k \right), \tag{1.8}$$

де µ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Па·с.

Сили негідродинамічної природи (електростатичні, неізотермічні градієнти та ін.) в турбулентному потоці відсутні.

При прийнятих припущеннях диференціальне рівняння руху окремо взятої частинки в турбулізованому середовищі набуває вигляду

$$\frac{\pi}{6}d_k^3\rho_k\frac{\partial u_{ki}}{\partial\tau} = 3\pi\mu d_k(u_i - u_{ki}) + \frac{\pi}{8}d_k^3\rho_k(\varpi_k u_{gki}) - \frac{1}{6}\pi d_k^3\rho_k g_i,$$
(1.9)

де u_i і u_{ki} – швидкості газу і частинки в *i*-му напрямку, м/с; ρ_k – густина частинок, кг/м³; τ – розглянутий момент часу, с; ϖ_k – швидкість кутового обертання частинки, од. вим.; u_{gki} – відносна швидкість поступального руху частинки.

Якщо члени рівняння (1.9) поділити на масу частинки $m_k = \frac{1}{6} \pi d_k^3 \rho_k$ і ввести в нього величину $\beta = \rho_k d_k^2 / 18 \mu$, що характеризує інерційність частинки, то

$$\frac{\partial u_{ki}}{\partial \tau} + \frac{1}{\beta} u_{ki} = \frac{1}{\beta} + \frac{3}{4} (\varpi_k u_{gki}) - g_i.$$
(1.10)

Значення кожного члена рівняння (1.10) докладно визначені у роботах [41, 42]. Ефект Магнуса–Жуковського виявляється лише для частинок діаметром більше 50 мкм у градієнтному полі швидкості, тобто в пристінних шарах [2].

Тому ефектом Магнуса–Жуковського, а також силою ваги внаслідок її малості в порівнянні з інерційною силою знехтувано. Тоді рівняння руху частинки спрощується:

$$\frac{\partial u_{ki}}{\partial \tau} + \frac{1}{\beta} u_{ki} = \frac{1}{\beta} u_i.$$
(1.10a)

Отже, сила аеродинамічного опору є основною, що діє на аерозольну частинку.

Миттєва швидкість *u_i* газового середовища являє собою суму осередненої *ū* та пульсаційної *u'* складових:

$$u = \overline{u} + u'. \tag{1.11}$$

Для спрощення запису. індекс "*i*" у позначеннях швидкості опускається. Пульсаційна складова швидкості газу змінює свій напрямок, частоту й амплітуду відповідно до законів турбулентності. Згідно з роботою [42] прийнято, що вона змінюється в часі як моногармонійна функція:

$$u = \overline{u} + u \sin \varpi \tau, \qquad (1.12)$$

де *u* – амплітудне значення пульсаційної швидкості газу; ϖ – кутова частота пульсацій.

Якщо підставити (1.12) у диференціальне рівняння миттєвого руху частинки (1.10) уздовж осі *X*, то

$$\frac{\partial u_{kx}}{\partial \tau} + \frac{1}{\beta} u_{kx} = \frac{1}{\beta} (u_x + u_x \sin \omega \tau).$$
(1.13)

Загальне розв'язання цього лінійного диференціального рівняння виражається сумою двох розв'язків, які утворюються при збереженні в його правій частині першого і другого доданків:

$$\frac{\partial u_{kx}}{\partial \tau} + \frac{1}{\beta} u_{kx} = \frac{1}{\beta} u_x.$$

За початкових умов $\tau = 0$, $u_k = u_{ko}$ розв'язання має вигляд

$$u_{k}^{(1)} = u \left(1 - e^{-\tau/\beta} \right) + u_{k(o)} e^{-\tau/\beta}.$$
(1.14)

Експонентний множник $e^{-\tau/\beta}$ характеризує розгін або гальмування (при $u_{k(0)} = u$) частинки. При більшому проміжку часу ($\tau > \beta$) експонентний множник прагне до нуля і розв'язання (1.14) визначається рівністю швидкостей газу і частинки $u_k^{(1)} = u$.

Друге рівняння однакове з рівнянням руху частинок в акустичному полі:

$$\frac{\partial u_{kx}}{\partial \tau} + \frac{1}{\beta} u_{kx} = \frac{1}{\beta} u_x \sin \omega \tau.$$
(1.15)

Його розв'язання за тих же початкових умов:

$$u_{kx}^{(2)} = \frac{u_x' \sin(\varpi \tau - \varphi)}{\sqrt{1 + \varpi^2 \beta^2}} + \frac{\varpi \beta u_x'}{1 + \varpi^2 \beta^2} e^{-\tau/\beta} + u_{ko} e^{-\tau/\beta}, \qquad (1.16)$$

де $\varphi = arctg \varpi \beta$ – кут зсуву руху частинок і газового середовища.

Зсув фази руху викликається інертністю частинок, унаслідок чого виникає запізнювання або випередження частинок щодо газового середовища.

Загальне розв'язання рівняння (1.13), що виражає швидкість частинки:

$$u_{kx} = u(1 - e^{-\tau/\beta}) + \frac{u'_{x}\sin(\varpi\tau - \varphi)}{\sqrt{1 + \varpi^{2}\beta^{2}}} + \frac{\varpi\beta u'_{x}}{1 + \varpi^{2}\beta^{2}}e^{-\tau/\beta} + 2u_{k(o)}e^{-\tau/\beta}.$$
(1.17)

Її можна розглядати як суму осередненої та пульсаційної швидкостей. Осереднену швидкість частинки дає перший доданок правої частини рівняння, несталу й стаціонарну складові пульсаційної швидкості – другий і третій доданки, процес розгону частинки – четвертий.

Якщо $\varpi \tau < 1$ та $\tau > \beta$ у сталій стадії процесу руху високодисперсних частинок, то експонентні члени в рівнянні прагнуть до нуля і воно спрощується:

$$u_{kx} = u_x + v_k u'_x \sin(\varpi \tau - \varphi)$$
(1.18)

де v_k – ступінь захоплення частинки пульсуючим середовищем;

$$v_k = \frac{1}{1 + \sigma^2 \beta^2}, \ v_k = u'_k / u',$$
 (1.19)

являє собою відношення амплітуд пульсаційних швидкостей частинки і середовища. Кут зсуву фаз і ступінь захоплення частинки можна записати так:

$$\varphi = \operatorname{arctg}(\pi \rho_k d_k^2 f / g \mu); \qquad (1.20)$$

$$\upsilon_{k} = \sqrt[1]{\sqrt{1 + (\frac{\pi \rho_{k} d_{k}^{2} f}{9\mu})}},$$
(1.21)

де $f = \varpi/2\pi$ – частота коливань.

Із цих виразів видно, що швидкість частинки тим менше відрізняється від швидкості газу, чим менші її діаметр і густина, а також чим більша в'язкість газу і

нижча частота його пульсацій. Частинка повністю захоплюється в пульсаційному русі газового середовища ($\mu \approx 1$) при $\varpi\beta < 1$ і не чутлива до пульсацій середовища ($\mu \approx 0$) при $\varpi\beta \ge 1$.

Виконані в [41] розрахунки показали, що в повітряному потоці при ступені захоплення $\upsilon_p = 0.8$ кут зсуву фази досягає більше 35°. Отже, високодисперсні частинки слідують за пульсаційними рухами газового середовища внаслідок інерційності з відставанням за фазою та меншою амплітудою $u'_k < u'$, але з безперервним надлишком швидкості наприкінці періоду пульсацій газового середовища.

У реальних умовах пульсаційний рух частинки складається з безлічі одноперіодних пульсаційних актів, подібних до розглянутих вище. Частота й амплітуда пульсаційної складової швидкості при цьому змінюються від акта до акта, будучи випадковими функціями часу.

Ступінь захоплення частинок у пульсаційному русі оцінюється за виразом (1.16) і залежить, головним чином, від їх діаметра й густини.

Аналіз густин частинок і крапель газових викидів показав, що частинки діаметром більше 20 мкм у ньому практично не беруть участь, а їх переміщення визначається тільки осередненим рухом газового середовища, менші частинки (*d_i* < 20 мкм) захоплюються в пульсаційний рух.

Згідно з наведеними даними використання пульсацій у гофрованих сітках дозволяє збільшити значення коефіцієнта уловлювання високодисперсних частинок у порівнянні з режимами течії без пульсацій [156].

Обтікання перешкод може супроводжуватися процесами відриву поверхневого шару, що характерно для початкової ділянки струменя, та іншими ефектами: наприклад, турбулентної дифузії і турбофорезу [41, 42, 44].

При перебігу дисперсного двофазного середовища в неізотермічних умовах виникає температурна нерівномірність, яка також впливає на рух.

У ряді випадків на рух частинок у потоці можуть впливати сили фотофорезу, дифузіофорезу та ін. [179].

У даний час розрахунок турбулентно-дифузійного перенесення частинок здійснюють найчастіше на основі першого закону Фіку для турбулентних потоків [29]. У роботах [41, 42, 44] відмічається існування поряд з турбулентною дифузією додаткового перенесення частинок у білястінній області – турбофорезу.

Максимальне значення пульсацій спостерігається на межі вузького підшару, нульове – на стінці. На цьому засновані моделі турбофоретичного перенесення частинок.

Механізм турбулентної дифузії частинок вивчали багато авторів. Найбільші успіхи досягнуті в роботах [41–47]. У даний час розрахунок турбулентнодифузійного перенесення частинок виконують найчастіше на основі першого закону Фіку для турбулентних потоків:

$$q = -(D_b + D_{td}) \cdot \partial C_m / \partial Y, \qquad (1.22)$$

де D_b і D_{td} – коефіцієнти броунівської та турбулентної дифузії відповідно, м²/с; Y – поперечна потоку координата.

Для високодисперсного аерозолю припускається, що коефіцієнти турбулентної дифузії газу і частинки рівні:

$$D_t = D_{td} = (u'_y)^2 \tau = u'_y \ l_T, \qquad (1.23)$$

де u'_y – поперечна складова пульсаційної швидкості газу, м/с; l_T – шлях перемішування турбулентного мольного об'єму, м.

Розрахунки осадження частинок з турбулентних потоків на стабілізованих ділянках каналів, навіть з використанням сучасних даних за коефіцієнтами молекулярної і турбулентної дифузії, дають значно занижені порівняно з експериментальними значення [41].

Тому треба очікувати існування поряд з турбулентною дифузією додаткового перенесення частинок у пристінній області. У [41] показано, що

розподіл поперечної складової пульсаційної швидкості носить у пристінній області яскраво виражений градієнтний характер. Максимальне значення пульсацій спостерігається на межі вузького підшару, а нульове – на стінці.

На цьому засновані моделі додаткового перенесення частинок. Розвиток турбулентно-міграційної теорії перенесення частинок розглянуто в [41], а турбофоретичної – в [48, 49]. Обидві теорії мають спільну основу – градієнтний характер пульсаційного руху в пристінній області.

У роботі [41] невпорядкований рух частинок фактично зведено до прямолінійного сповільненого руху і при інерційному руху стоксових частинок у градієнтному полі для швидкості переміщення частинок отримано вираз

$$U_{t} = -\beta u' \frac{\partial u'}{\partial Y} = -\frac{1}{2}\beta \frac{\partial (u')^{2}}{\partial Y}.$$
(1.24)

Аналогічний вираз отримано в [48] на основі турбофоретичної моделі, згідно з якою зважені в газі частинки отримують у турбулентних потоках з боку стінки менші імпульси, оскільки поперечні пульсації газу нижче, ніж з боку ядра потоку. Тому в градієнтному полі поперечних пульсацій на зважені частинки діє особлива турбофоретична сила.

За аналогією з неізотермічним градієнтом, який спостерігається у градієнтному полі температур унаслідок градієнта квадрата швидкості молекул, передбачається, що турбофоретична сила пропорційна градієнту квадрата швидкості поперечних пульсацій газу.

Рух частинок подано ланцюжком вільних інерційних польотів з тривалістю кожного, яка дорівнює терміну часу релаксації частинки β . Відстань, що проходить в інерційному польоті частинка, $l_i = u'\beta$. Швидкість турбофоретичного руху частинок записано виразом

$$U_t = -\beta \frac{\partial (u')^2}{\partial Y}.$$
(1.25)

У розглянутих роботах при різному розумінні механізму процесу робиться висновок: головним фактором, що визначає перенесення частинок, є інтенсивність турбулентних поперечних пульсацій швидкості в пристінній області.

Існують різні способи впливу на турбулентні характеристики потоку – від турбулізації всього потоку до генерації турбулентних вихорів у пристінній області. При їх виборі необхідно враховувати величину енергетичних витрат.

У роботах [43, 44] показано можливість інтенсифікації осадження частинок за рахунок відривних течій, що утворюються на кромках початкових ділянок та мікровихорів, що виникають на виступах стінок каналів, висота яких не перевищує товщину гідродинамічного пристінного примежового шару.

У каналах некруглої форми при турбулентному режимі течії в кутових зонах виникають вторинні течії, що сприяють осадженню частинок.

Застосування в пристроях для очищення газів послідовно розташованих каналів некруглої форми з виступами на стінках дозволяє отримати високу ефективність очищення. Аерозольні середовища енергетичних установок характеризуються полідисперсним складом дисперсної фази.

Для розв'язання питань сепарації та утилізації багатофазних середовищ енергетичних установок необхідно розрізняти дві основні групи крапель: дрібні – від зародкових (менше 1 мкм) до 10 мкм і крупні краплі діаметром більше 20 мкм.

Рух крапель першої групи визначається молекулярними законами перенесення, другої – макрозаконами. З урахуванням вищевикладеного інтенсифікація осадження низькоінерційних частинок перспективна в градієнтних полях швидкостей, тисків, пульсацій, температур, акустичних коливань.

1.3 Аналіз сучасних сепараційних технологій очистки аерозольних середовищ для енергетичних установок

Створення високоефективних та економічних тепло- і масообмінних апаратів, сепаруючих пристроїв є значним резервом підвищення коефіцієнтів корисної дії енергетичних установок, поліпшення використання паливоенергетичних ресурсів (рис. 1.3).

Джерела утворення аерозольних середовищ в енергетичних установках та застосоване сепараційне обладнання наведено в табл. 1.1 [140].

Технічна досконалість сепараційних пристроїв характеризується масогабаритними показниками, витратами енергії на переміщення робочих середовищ, технологічністю [128].

Інтенсифікація процесів сепарації – один з ефективних способів зниження маси і габаритів, підвищення економічності, надійності роботи цих пристроїв та енергетичних установок у цілому [138].

В енергетичних установках для очищення газу знайшли застосування силові поля, фільтрація та сорбція. У схемах і пристроях очищення часто послідовно використовують декілька способів очищення.

Область застосування цих засобів та їх ефективність для промислового очищення газів визначаються характеристиками очисних пристроїв, що реалізують зазначені способи [128].

До основних характеристикх очисних пристроїв належать:

 ефективність очищення (коефіцієнт сумарної та фракційної ефективності очищення);

– гідравлічний (аеродинамічний) опір;

– витратна характеристика;

– термін служби.



Рисунок 1.3 – Дисперсний склад аерозолів, основні механізми їх очищення та існуючі типи сепараційних технологій

Таблиця 1.1 – Джерела утворення аерозольних середовищ в енергетичних установках та їх характеристики

Джерело	Склад аерозолю	Концентрація на виході, г/м ³	Концентрація після штатних очисників, г/м ³	Розміри частинок, мкм до після		
				очищення	очищення	
Випускні гази	Зипускні гази СО		Сепараційні	_	—	
теплових	C _x H _y	0,20,4	очисники	_	_	
двигунів (ДВЗ, ГТД), маттір	NO _x	0,40,2	відсутні	_	_	
	С	0,010,01		_	_	
KOIJIB	НСОН	0,0010,01	0,050,10	12000	150	
		0,0750,01	0,050,10	_	—	
Вентиляція картера ДВЗ	Масляний	1,020,0	0,42,0	0,5200,0	0,550,0	
Система суфлювання ГТД	Масляний	Відцентрові суфлери: 2005000	2,010,0	0,1500,0	0,150,0	
		Статичні Масловідді- льники: 2005000	0,61,0	0,1500,0	0,14,0	
Редуктор ГТЗА	Масляний	0,250,50	0,05	0,0320,00	0,031,00	
Компресори	Водо- масляний	5,010,0	0,050,50	0,5500,0	0,520,0	
Маслобак ГЦН АР	Масляний	0,250,5	Сепараційні очисники відсутні	0,550,0	0,550,0	
Системи кондиціону- вання	Водяний	0,250,5	Жалюзійні 0,10,2	0,550,0	0,520,0	
ЕУ «Екопір»	Тверді, рідкі частинки	Відцентрові сепаратори: 1,020,0	2,010,0	0,5200,0	0,550,0	
	Тверді, рідкі частинки	Статичні масловідді- льники: 1,020,0	0,61,0	0,5200,0	0,550,0	
	Тверді, рідкі частинки	Пульсаційні та неізотер- мічні 1,020,0	Сепараційні очисники відсутні	_	_	

У даний час не існує єдиного критерію оцінки якості різних пристроїв очищення за цими параметрами. У технічних даних часто вказують пропускну

здатність або номінальну витрату газу як параметр, що визначає витрату газу при найбільшому рекомендованому перепаді тиску або найбільшій швидкості середовища, яка встановлюється виходячи з умов забезпечення ефективності очищення. Для пристроїв очищення інерційного типу вказують також величину найменшої швидкості потоку, при якій ще забезпечується задана ефективність.

Для подібних пристроїв термін служби пов'язаний з тривалістю роботи до заміни або регенерації фільтроелементів, електродів або адсорбентів. Термостійкість робочі інтервали визначає температури навколишнього середовища і потоку стиснутого газу, в яких гарантується нормальна робота пристроїв очищення та осушення.

Процес очищення газу від забруднень унаслідок їх взаємодії з елементами пористої перегородки називається фільтрацією [8, 34, 35, 50, 125]. Фільтруючі матеріали (пористі перегородки) умовно поділяють на два види: поверхневі (частинки утримуються поверхнею фільтруючого матеріалу) та об'ємні (частинки утримуються не тільки на поверхні, але і в товщі фільтруючого матеріалу). До поверхневих фільтруючих матеріалів належать сітки, папір, тканини, до об'ємних – картон, металокераміка, кераміка, волок і т. д., а також пакети, що складаються з декількох шарів поверхневих фільтруючих матеріалів.

Високою ефективністю уловлювання тонкодисперсних аерозолів мають фільтри з пористих і волокнистих матеріалів. Коефіцієнт уловлювання таких фільтрів визначається пористістю матеріалу, його товщиною й величиною контактної поверхні. Так, наприклад, англійська фірма «Vokes» [65] випускає фільтри різної продуктивності; як фільтруючий матеріал тут застосовуються папір, металокераміка, бавовняні волокна, активоване вугілля, синтетичні матеріали, мінеральна вата та ін.

З рекламних матеріалів фірми видно, що за допомогою таких фільтрів можна досить ефективно очищати гази від тонкодисперсного рідкого аерозолю. Істотними їх недоліками є високий аеродинамічний опір, низький ступінь осадження, необхідність регенерації.

Останнім часом з'явилися конструкції фільтрів, у яких передбачається відвід уловлених рідких частинок за допомогою різних конструктивних заходів. Так, у деяких конструкціях [11] уловлений аерозоль під дією градієнта капілярних сил стягується до периферійних зон і стікає по спеціальних канавках. Однак у ряді випадків капілярні сили в місцях, де матеріал фільтра стиснуто, значно перевищують сили тяжіння і краплі в канавки не стікають. Для покращання їх роботи автори [11] пропонують обладнання для струшування фільтра, що зменшує надійність роботи агрегату очищення в цілому, а також ускладнює його конструкцію.

У ряді конструкцій [21] уловлений аерозоль відводиться з фільтруючого матеріалу за допомогою відцентрових сил. Для цього фільтруючий матеріал закріплюється на роторі, всередину якого подається полідисперсна фаза, що очищається. Проходячи через фільтруючий матеріал, газ очищається від крапельок рідини, що відцентровими силами відкидається на внутрішню стінку корпусу.

Розроблений у НДІСТ електричний сепаратор типу МВУ-30 [23] при швидкості потоку 2 м/с, напрузі на коронуючих електродах 13,2 кВ і концентрації рідкого аерозолю до фільтра 0,078...0,279 г/м³ забезпечує ефективність уловлювання в середньому 80...90 %. При цьому уловлюється аерозоль, що отримується у результаті конденсації парів середовища. До основних недоліків електричних фільтрів можна віднести: великі габарити, висока напруга, що вимагає додаткових заходів електробезпеки, закоксовування електроприладів.

Комбіновані сепаратори одержали широке розповсюдження, тому що шляхом об'єднання декількох способів уловлювання аерозолів в одному агрегаті можна вирішувати завдання очищення газів у різних галузях промисловості. Так, у США на двигунах внутрішнього згоряння встановлюється багатоступінчастий сепаратор [23, 125], призначений для очищення картерних газів від крапель масла. У цьому сепараторі дрібні краплі коагулюють у волокнистому фільтруючому патроні-коагуляторі, а потім крупні краплі уловлюються на спеціальному спіралеподібному сепаруючому елементі. Ряд варіантів комбінованих краплеуловлювачів запропоновано у роботі [1, 2].

Значних успіхів в очищенні газів підвищеного тиску досягла компанія «Selton», яка виробляє сепаратори з різною пропускною здатністю і незначним перепадом тиску (від 0,6 МПа) [140]. Також значну частину ринку і встановлення обладнання сепарації для очищення газів підвищеного тиску зайняла німецька фірма «Parker» (G-cepiя) [140]. У запропонованих конструкціях для очищення використовують спеціальні фільтри, які здатні витримувати тиск більше 2,5 МПа з об'ємною витратою робочого середовища 750...2000 м³/год [38, 43, 48, 55, 58, 59, 80–90].

У роботах [97, 114–116] наводяться результати дослідження інерційних водовідокремлюючих пристроїв для суднових ГТУ (рис. 1.4), в яких відокремлювання крапель води відбувається при різкій зміні напряму руху або швидкості повітряного потоку.

З даних, поданих на рисунку, видно, що ці пристрої ефективно працюють при швидкості потоку до 5...7 м/с, ефективності уловлювання 95...98 %. Сепаратор такого типу використаний у повітроприймальному пристрої CBK «AGFH». Ефективність цих сепараторів для частинок більше 15 мкм складає 95 % при швидкості потоку 6...7 м/с [140].

На рис. 1.5–1.7 наведено конструктивні схеми інерційних сепараторів.

У вихрових сепараторах (рис. 1.5, *a*) відведення частинок на стінки циліндричного корпусу здійснюється під дією відцентрових сил, що виникають при закрученні потоку в другому лопатковому завихрювачі. Ефективність сепарації в таких пристроях в основному залежить від кута закручення в лопатковому завихрювачі, конструкції пасток і може досягати 95 %.

Інерційні сепаратори з плавними поворотами повітряного потоку подані на рис. 1.5, *б*, *в*. Криволінійні лопатки водовідокремлювача можуть мати порожнини для обігріву і відводу рідких частинок. Такі пристрої мають ефективність до 95 % для частинок більше 15 мкм при швидкості повітряного потоку 19,5 м/с, гідравлічний опір яких складає 130...250 Па.

У НУК ім. адмірала Макарова розроблено однохвильові сепаруючі профілі МКІ (див. рис. 1.5, г), характерною особливість яких є створення сполучення

підошви хвилеподібної частини з плоскими вхідним і вихідним ділянками, в тілі яких виконані відвідні канавки. На ці профілі випущена нормаль ПК-15337. Промислове виготовлення профілів з алюмінієво-магнієвого сплаву (АМГ-2) освоєно на металургійному заводі методом пресування, з пластмаси – на Чорноморському суднобудівному заводі. На конструкцію профілю отримано авторське свідоцтво і патенти.



Рисунок 1.4 – Схемні рішення та результати дослідження інерційних водовідокремлюючих пристроїв для суднових газотурбінних установок



Рисунок 1.5 – Конструктивні схеми інерційних сепараторів: *а)* прямоструминний циклонний краплеуловлювач; *б)* лабіринтний сепаратор; *в)* однохвильові профілі НКІ з канавками; *г)* відцентровий сепаратор; *д)* коагуляційний елемент; *е)* схема типової труби Вентурі



Рисунок 1.6 – Конструктивні схеми інерційних сепараторів: *а*) конструкція з пульсаційним сепаратором; *б*) конструкція зі змінним модулем; *в*) конструкція з ультразвуковим модулем; *г*) конструкція з вібруючим модулем



Рисунок 1.7 – Сепаратори для пневмосистем на основі сепараційних аерозольних технологій з одним (*a*), двома (*б*), чотирма (*в*), шістьма (*г*) струминними модулями [82]:

1 – корпус; 2 – патрубок підведення повітря; 3 – конденсатовідвідник;
 4 – струминний модуль; 5 – козирок

Однорядний і дворядний пакети однохвильових сепаруючих профілів забезпечують уловлювання крапель діаметром більше 20 мкм з коефіцієнтом уловлювання більше 99,5 %.

У ротаційних інерційних сепараторах (див. рис. 1.5, *д*) значно розширені діапазони робочих швидкостей за рахунок інтенсифікації сепарації частинок додатковими інерційними і коріолісовими силами, що виникають при обертанні поверхонь. Ефективність сепарації таких пристроїв для частинок більше 20 мкм лежить у межах 35...58 % при високих вісьових швидкостях потоку повітря у повітрозабірнику.

Обертання лопаток може відбуватися від набігаючого потоку повітря, вала ротора двигуна або спеціального приводу. Для підвищення ефективності

очищення повітря замість обертових лопаток можна встановлювати обертову сітку. Недоліком ротаційних сепараторів є відносно складна конструкція.

Оскільки всі типи перерахованих інерційних сепараторів мають низьку ефективність очищення повітря від частинок розміром менше 15 мкм, то їх в основному використовують як перший ступінь повітроочисних пристроїв з двоступеневою і більше системою очищення.

Більш ефективним способом уловлювання частинок усіх розмірів є очищення газів методом фільтрації, яка здійснюється за допомогою пористих середовищ. Зважені в повітряному потоці частинки осідають на поверхні або в пористому обсязі за рахунок броунівської дифузії, ефекту дотику (зачеплення), інерційних, електростатичних і гравітаційних сил [25, 29].

Як фільтруючі перегородки застосовують плетені дротяні, вініпластові й капронові сітки, скловолокнисті матеріали, пінополіуретан, неткані фільтруючі мати із синтетичних волокон, голкопробивні неткані полотна із синтетичних волокон, фільтруючі матеріали із суміші натуральних і хімічних волокон.

Існує чотири методи технічного обслуговування повітряних фільтрів: повна заміна фільтра, заміна фільтруючого середовища матеріалу, промивка або очищення (регенерація матеріалу) і самоочищення.

Для уловлювання грубого атмосферного пилу широкого розповсюдження набули комірчасті фільтри з промаслених сіток конструкції Є.В. Рекпи, сітчасті фільтри з поліетилену, фільтри з пінополіуретану та ін.

Такі фільтри мають обмежений термін роботи і повинні замінюватися або регенеруватися через кожні 250...2000 годин експлуатації залежно від початкової запиленості повітря.

Більший термін роботи між регенерацією або заміною фільтруючих матеріалів повітроочисників мають рулонні фільтри, в яких суха волокниста тканина насичується пилом і автоматично перемотана з верхнього барабана на

нижній при досягненні заданого гідравлічного опору. Очищення рулонів не передбачено, але термін їх безперервної роботи зазвичай складає близько року.

Для підвищення ефективності уловлювання частинок і забезпечення безперервної дії повітряних фільтрів застосовуються установки з автоматичною регенерацією фільтрувальної поверхні.

До пристроїв цього типу належать самоочисні масляні фільтри, які складаються з безперервно рухомих у вертикальній площині фільтраційних нескінченних панелей і масляної ванни. При проходженні через масляну ванну забруднені ділянки фільтра відмиваються і заново змащуються маслом, а бруд осідає на дні ванни у вигляді шламу, звідки періодично видаляється.

Недоліком цих фільтрів є винесення повітрям крапель масла в проточну частину енергетичних установок, які викликають відкладення на лопатках компресорів і турбін, що погано видаляються.

Одним із простих і ефективних способів очищення газів від зважених частинок є мокрий спосіб очищення. Так, у разі підвищеної запиленості повітря (більше 2 мг/м³) комірчасті фільтри, виготовлені з корозійностійких матеріалів, можуть бути використані як зрошувані, оскільки такі фільтри безперервно очищаються від осідаючого в них пилу та опір їх залишається постійним. Фірма «Свенська Флактфабрікен» (Швеція) застосовує такі фільтри в системах вентиляції суховантажних морських суден, де запиленість повітря досягає великих розмірів, особливо при завантаженні й розвантаженні вугілля, руди, мінеральних добрив та інших сипучих вантажів.

Зрошення в цьому випадку проводиться забортною водою з витратою близько 0,1 л/м³. Похило встановлений фільтруючий шар зрошується з боку входу повітря за допомогою форсунок. Пропускна здатність установок, застосованих на деяких суднах, перевищує 100 тис. м³/год.

Німецька, іспанська та американська компанії («Selton», «Pall Corporation», «Zander», «FORCE», «Contec» і «Gora») займаються дослідженням та виготовленням сепаруючого обладнання.

Компанія «Contec» виготовляє сепаратори масляного туману серії SG, RG, DL, CKF/CSF з різноманітними модифікаціями фільтрів [140].

Сепаратори масляного туману – фільтр зі скловолокна та спеціально розроблені елементи, двошарова конструкція з вбудованою армуючою тканиною (отримана злиттям), оптимізує і забезпечує постійну високу сепарацію до 99,99... 99,95 % при 0,1 мкм розміру крапель.

У табл. 1.2 наведені найбільш конкурентоспроможні фірми з виробництва сепаруючих пристроїв, здатних вловлювати до 99,99 % твердої та рідкої фаз. Загальним недоліком фільтрів є непрогнозований ресурс роботи, зміна фільтра викликає зупинку роботи установки в цілому.

Тому доцільним є вивчення та використання сепараційних модулів з самоочисною технологією.

Проведений аналіз конструкцій і роботи різних типів сепараторів показує, що при використанні розглянутих типів сепараторів для систем очищення суднових ГТУ необхідне установлення комбінованого сепараційного модуля [159].

Як перший ступінь очищення можуть бути рекомендовані низькошвидкісні жалюзійні водороздільники або середньошвидкісні вихрові сепаратори, які досить ефективно проводять очищення крупно- і середньодисперсних частинок.

Як другий ступінь очищення для сепарації крапель менше 10...15 мкм рекомендується використовувати фільтруючі елементи з пористих матеріалів.

Таблиця 1.2 – Показники сепараційного обладнання закордонного виробництва

Фірма- виробник	Модель	Поверхня фільтрації, м ²	Мінімальна/ максимальна температура експлуатації, °С	Вміст твердих частинок на виході, мг/м ³ ; ефективність очищення від твердих частинок, мкм	Ефективність очищення, %	Продуктивність, м ³ /год	Максимальний перепад тиску, МПа
Selton	ГПР 445, ГПР 667	0,58	-75, +120	10	100	_	0,05
Selton	9400GO39H	0,135		3 мкм			
PALL	9600G	0,038	+140				
	8300GO16H	0,054		10 мкм			
	ΦΓ-200				99,8	45000	0,05
Selton	ΦΓ-15-100-6		-40,	Від 20		15000	
	ФВ-200		+45	МКМ		30000	
	ФВ-100					9000	
	G_WA			35 мкм		2800	
	SFH					12540	
ZANDER	STH/SFH-P					5400	
	Microfilter G16.	-		3		28980	
	F16						
	Microfilter G25-			0,001		4980	
	G350			МКМ			
	S					1950	
	Puresorb AKM,			0,003 мг/м ³		6102	
	AKN					0102	
	Puresorb HDA					1182	
FORCE	FTP 008		_	0,01 мкм	_	51	0.012
	FTP 012				_	72	0,012

PALL Corpo-	FTP 018 FTP 030 FTP 055 FTP 080 FTP 120 FTP 160 FTP 250 FTP 400 PFS4463ZMH13 PFS1001ZMH13	0,078	+60, +121	0,3 мкм	99,99	111 198 330 486 750 1008 1,56 2520	0,34
ration	11510012101115	0,204	T121				
	180/435					20	
Contec	300/935	0,15	-20, +40	0,1 мкм	99,95	40	
	550/980					100	_
	1,500/980					170	
	2,200/630					290	

Підприємством п/с В-8662 на базі рекомендацій згідно з досвідом проектування та використання розроблені сітчасті фільтри для морських ГТУ [95, 96, 97]. Виходячи із цього рекомендуються фільтри наступних параметрів:

Щільність набивання	910 %
Товщина фільтра	.0,1 м
Діаметр нитки	5,14,0 м
Матеріал	Поліетилен
Швидкість повітря на вході у фільтр	.2,03,6 м/с
Гідравлічний опір	100250 Па

За даними, наведеними в роботі [98], такий сітчастий фільтр з вбудованими інерційними решітками (рис. 1.8) забезпечує очищення повітря від піску з ефективністю більше 90 % при видалені 2,5 % повітря із системи дренажу, а подальше підвищення ефективності очищення повітря рекомендується здійснювати за рахунок збільшення захоплюючої здатності волокон у результаті змочування їх прісною водою в процесі очищення.

Випробування фільтрів при подачі в них через колектор 6 зрошувальної рідини в кількості 28...30 г води/кг повітря показали, що ефективність очищення від твердих частинок (пісок з $d_{\rm T} = 50...90$ мкм) підвищилася до 97...98 %, а ефективність очищення від води – до 99,0...99,6 %.



Рисунок 1.8 – Коструктивна схема сітчастого фільтра з вбудованою інерційною решіткою:

1 – сітчастий фільтр; 2 – інерційна решітка; 3 – дренажна система
 сітчастого фільтра; 4 – дренажна система інерційної решітки; 5 – інерційний
 ступінь очистки – жалузійний сепаратор; 6 – колектор подачі промивної води

На підставі результатів експериментальних досліджень натурного повітроочисного приладу (ПОП) рекомендуються такі системи очищення повітря для суден на повітряній подушці (СПП) залежно від пропонованих до них вимог і умов експлуатації [97].

Система ПОП, що складається з одного ступеня сітчастого фільтра, змочується прісною водою. Застосування цієї системи вважається можливим при температурі повітря на вході у ПОП не нижче 5 °C. Ефективність очищення системи на піску ($d_4 = 50...80$ мкм) досягає значень 0,98, на воді – 0,996 при опорі 685...785 Па.

Система ПОП складається із секції сітчастого фільтра з вбудованою в ній інерційною решіткою. Ця система може бути використана при температурі повітря на вході у ПОП не нижче 5 °C і присутності прісної води на СПП для змочування фільтра. Ефективність очищення системи на піску 0,96, на воді – 0,97 при опорі 1080 Па.

Двоступенева система очищення складається з обігріваного жалюзійного сепаратора з порожнистими жалюзями і сітчастого фільтра з вбудованими інерційними решітками.

Ефективність очищення системи на піску 0,975, на воді 0,97 при опорі 1275 Па. Двоступенева система ПОП складається з двох елементів.

Як перший ступінь використовується вихровий сепаратор довжиною 0,8 м, в якому відношення довжини до діаметра циклона 1 : 3,64.

Завихрювач має чотири лопатки, виконані за гвинтовою лінією з перекриттям 40 мм. Як другий ступінь установлені голкоподібні сітчасті фільтри товщиною 0,1 м. Ефективність системи на піску дорівнює 0,985, а на воді 0,97 при опорі 2450 Па (на швидкості першого ступеня 19,5 м/с).

Для газотурбоходів (ГТХ) на обаладнанні типу «Циклон» прийнята двоступенева схема повітроочисного пристрою, яка складається із жалюзійного

зварного сепаратора і похилого сітчастого фільтра. Перший і другий ступені ПОП максимально рознесені між собою.

Сітчасті фільтри мають оптимальні параметри за швидкістю повітря (менше 3 м/с), щільністю набивання (5,5 %) і товщиною набивання (0,1) із середнім вмістом солі у повітрі перед вхідними решітками.

Для ГТХ «Циклон» - складає 0,144 мг/кг; між ступенями – 0,054 мг/кг та для М-37 – 0,0102 мг/кг. Втрати тиску в ПОП складають 1100 Па [98].

Для ГТУ швидкохідного контейнеровоза з горизонтальним способом грузообробки типу «Капітан Смірнов» потужністю 2×18400 кВт розроблено два ступеня краплеуловлюючого пристрою.

Перший ступінь призначено для уловлювання крапель розміром більше 15...20 мкм, другий ступінь – для уловлювання мікрокрапель, твердих частинок солей, пилу, сажі.

Перший ступінь сепаратора складається із чотирьох секцій, зварених на перегородку. Кожна секція розміром 1580×2000×155 мм складається з двох пакетів однохвильових профілів МКІ (нормаль ПК-15837): верхнього і нижнього.

Крок профілів у пакеті 20 мм. У нижній частині кожного пакета передбачений піддон для збору відсепарованої вологи, яка відводиться через вертикальні дренажні канали.

Другий ступінь сепаруючого пристрою виконаний у вигляді контактного фільтра.

Сепаратор установлюється по чотири секції. Секція набирається із 16 горизонтальних касет з кроком 200 мм.

Як фільтруючий матеріал у касетах застосований модифікований пінополіуретан ППУ-Е-35-0,8 по МРТУ-05-1150-68, який оброблявся за спеціальною технологією з метою підвищення проникності й зниження аеродинамічних опорів (витримка протягом 10 хв у водному розчині луги з наступною нейтралізацією в слабкому розчині оцтової кислоти).

Коефіцієнт уловлювання першого ступеня складає 60...90 %, другого – 95,0...99,9 %. При солевмісті потоку до 1·10⁻⁶ кг/кг двоступеневий сепаруючий пристрій забезпечує зниження солевмісту повітря до 0,01·10⁻⁶ кг/кг.

Сумарний аеродинамічний опір двоступеневого сепаруючого пристрою перед початком роботи не перевищував 1000 Па при швидкості повітря перед першим ступенем 8 м/с і перед другою 3,2 м/с. У процесі роботи опір пристрою збільшується в результаті накопичення солі в його другому ступені.

Солевміст фільтра, при якому його опір подвоюється, дорівнює 0,76 кг/м². Регенерація пінополіуретану полягає в промиванні його прісною водою [99, 100].

У Національному університеті кораблебудуваня імені адмірала Макарова розроблено двоступеневий сепаруючий пристрій [101, 102], в якому як перший ступінь застосований однорядний пакет сепаруючих профілів МКІ (нормаль ПК-15837), а як ступінь тонкого очищення встановлений вибір горизонтальних касет з комбінованим фільтром, що складається із 20 мм вулканізованого волоса і 20 мм капронового волокна ЗТ-7.

Цей фільтр забезпечує допустимий залишковий солевміст 0,01·10⁻⁶ кг/кг при початковому солевмісті до 1,2·10⁻⁶ кг/кг. При швидкості повітря на вході 3,2 м/с початковий аеродинамічний опір дорівнює 700 Па.

Час роботи фільтра до заміни капронового волокна і регенерації вулканізованого волоса при солевмісті повітря 0,05·10⁻⁶ кг/кг складає 2500 год, що майже в 2 рази вище, ніж для пінополіуретанового фільтра.

Фірма Premaberg Ltd (Англія) розробила компактні триступеневі фільтри типу Compact [88].

Для першого і третього ступенів сепарації застосовані інерційні лопатки покращеної конструкції з легкого сплаву. Між цими ступенями в строго фіксованому положенні розміщена панель фільтра, що працює за принципом коалесценції. Практичне значення має сепарація крапель діаметром 4 мкм і більш крупних (ефективність 99,9 %). Фільтри Compact установлюються на вартових кораблях ВМС Англії типу Veapon [5].

У НУК імені адмірала Макарова розроблений подібний краплеуловлюючий пристрій з коагулятором, що складається з двох пакетів уніфікованих профілів і стільникового коагулятора, розміщеного в зазорі між цими пакетами [99].

Коагулятор являє собою послідовний набір коротких трикутних каналів (стільників) малого еквівалентного діаметра, виконаних з плоских і гофрованих пластин або сіток. Осадження мікрокрапель по стінках трикутних каналів супроводжується їх злиттям (коагуляцією) та утворенням плівки рідини, яка зривається у вигляді повітряних крапель і вловлюється заднім пакетом профілів.

Краплеуловлюючий пристрій забезпечує повне уловлювання крапель діаметром більше 8 мкм: 98...99 % – крапель діаметром 5...7 мкм; 90...95% – крапель діаметром 3...5 мкм; 80...92 % – крапель діаметром 1...3 мкм.

Конструкція краплеуловлюючого пристрою з коагулятором захищена авторським свідоцтвом СРСР [103] і патентом Франції.

Вище вже зазначалося про те, що на характеристики сепаратора істотно негативний вплив здійснює підвищення температури поступального повітря, а при його температурах +2...–10 °C настає обмерзання вхідних пристроїв.

Таким чином, існує необхідність створення комплексної системи повітропідготовки для забезпечення певної якості повітря на вході в ГТУ.

Комплексна система повітропідготовки повинна включати в себе наступні елементи: очищування повітря (грубого і тонкого очищення або суміщеного); пристрої для регулювання температури (охолодження в літній період експлуатації та нагрівання в осінньо-зимовий період).

1.4 Обгрунтування мети і постановка завдань досліджень

У зв'язку з погіршенням екологічної обстановки у світі й збільшенням кількості аерозольних викидів був прийнятий цілий ряд нормативно-правових документів, які обмежують викиди з енергетичних установок (ЕУ), зокрема для технологій очищення газів у переробних заводах.

Небезпека газових викидів енергетичних установок викликає необхідність подальшого вивчення їх складу й властивостей з метою розробок нового обладнання для газоочищення.

Аерозольні викиди включають у себе забруднення від систем комфортного й технічного кондиціювання. У складі цих викидів є частинки антропогенного походження, а також витоку холодоагентів. Основна кількість шкідливих домішок у газових викидах припадає на випускні гази й системи вентиляції картерів, підшипникових вузлів, маслобаків і ін.

За існуючою класифікацією газові викиди належать до технологічних аерозолів [1]. Останніми роками досягнуті певні успіхи в створенні сепараційного обладнання для ЕУ. У цій сфері широко відомі роботи Центрального котлотурбінного інституту ім. І.І. Ползунова (Росія), Науково-дослідного інституту очищення газів (Росія), Інституту тепломасообміну АН Білорусії [2], Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), а також зарубіжних дослідників у цих напрямах [3].

У багатьох роботах відзначається ефективність використання води як нейтралізатора з подачею її в зони горіння в складі паливо-водяної емульсії у вигляді пари.

Одночасно розроблюються спроби очищення випускних газів від оксидів азоту за допомогою селективних каталітичних фільтрів з попередньою обробкою газів аміаком. При досить високому ступені очищення такі фільтри мають високу вартість, а також значні масогабаритні показники, складні й небезпечні в експлуатації за рахунок використання аміаку [4].

У роботах [3, 5] підтверджена ефективність інтенсифікації очищення високодисперсних частинок за рахунок неізотермічного градієнта, що з'являються при русі дисперсних двофазних середовищ у неізотермічних умовах у каналах або при обтіканні розвинених поверхонь осадження. Рух потоків у реальних сепараторах, де мають місце значні градієнти швидкостей і концентрацій у поперечному поздовжньому й напрямках, описується еліптичними рівняннями, розв'язуються скінченнорізницевими диференціальними які методами.

Широко відомі роботи Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України, Центрального котлотурбінного інституту ім. І.І. Ползунова (Росія), Інституту тепломасообміну АН Білорусії, Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова та ін. Для практичного спрямування найбільш ефективними вважають методи, засновані на усередненні системи рівнянь у частинних похідних, що описують універсальні закони збереження маси, енергії та імпульсу в турбулентній системі [6]. Ця система повинна бути доповнена рівняннями стану і зв'язку параметрів, а також початковими й граничними умовами.

Найбільший прорив у цьому напрямку відбувся з розробкою сучасних пакетів прикладних програм [7], які дозволили числовими методами проводити розв'язання складних практичних завдань гідродинаміки аерозольних середовищ.

Як відмічено вище, в теперішній час мають місце сепараційні технології і пристрої, що їх реалізують, які здатні робити очистку від частинок розміром вище 10 мкм з ефективністю не менше 0,99. Очистка газових і рідких середовищ від частинок менше 10 мкм менш ефективна та потребує розробки газоочисного сепараційного устаткування, здатного уловлювати частинки таких розмірів і застосовувати ресурсозберігаючі можливості самих установок за рахунок використання енергії робочого тіла. Інтенсифікація осадження низькоінерційних частинок перспективна в градієнтних полях швидкостей, тисків, пульсацій, температур, акустичних коливань, для чого необхідно розробити градієнтні сепараційні аерозольні технології та їх впровадити в енергетиних установках. Альтернативним методом опису фізичних процесів у багатофазних потоках є математичні моделі та крайові умови, що визначаються ймовірнісними характеристиками і застосовують ймовірнісні підходи до досліджень.

Науковою проблемою використання градієнтних технологій очистки є відсутність достовірних закономірностей локального та сукупного впливу гідродинамічних, теплових і масообмінних процесів на рух частинок багатофазних потоків у примежових шарах багатофункціональних поверхонь енергетичних установок.

Значна кількість сучасних досліджень висадження дрібнодисперсної фази базується на аналізі руху частинок діаметром 1...10 мкм при різних термогідродинамічних умовах на основах математичного та фізичного моделювання. Градієнти температур, тиску та концентрацій можливо використати для досягнення необхідної траєкторії руху частинок, що буде сприяти процесу осадження в досліджуваній зоні [139].

дослідженнях У термогідродинамічних процесів турбулізацією 3 багатофазного потоку [16, 57] обгрунтовано ефективність використання пульсаційних складових швидкості та тиску на процеси осадження частинок на закономірності поверхнях. Однак впливу форми та розташування багатофункціональних поверхонь на фракційну ефективність осадження аерозолів у примежових шарах очисного обладнання ЕУ у наведених дослідженнях відсутні. Вплив форми і розмірів багатофункціональних поверхонь на процеси осадження визначається розподілом температурних, концентраційних та швидкісних примежових шарів. Взаємна дія градієнтів різних фізичних показників визначає розміри частинки та її розташування відносно ділянки поверхні, де вона повинна осадитися. Таким чином, одна і та ж ділянка поверхні характеризується фракційною ефективністю осадження для частинки заданого розміру в умовах розподілу швидкості й температури у поверхні. Визначення ймовірнісної оцінки ефективності уловлювання у примежових фракційної аерозолів шарах багатофункціональних поверхонь та пошук закономірностей їх зміни вздовж цих поверхонь є недослідженою раніше частиною проблеми [141].

Мета дослідження – створення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементація в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок.

Завдання дослідження:

• виконати аналіз процесів перенесеня частинок у дисперсних багатофазних потоках енергетичних установок і виявити перспективні способи інтенсифікації процесів очищення за рахунок сил інерції, акустикофорезу, турбофорезу, неізотермічного градієнта та ін.;

• розробити узагальнену математичну модель процесів сепарації градієнтних аерозольних технологій та обґрунтувати методи дослідження;

розробити схеми узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій;

 3D-моделюванням 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 і пристроїв, що їх реалізують, для сучасних і перспективних енергетичних установок;

 довести достовірність отриманих наукових положень результатами експлуатації систем і пристроїв з інтенсифікацією процесів очищення в складі елементів і систем енергетичних установок.

Об'єкт дослідження – технології інтенсифікації процесів сепарації в аерозольних дисперсних середовищах.

Предмет дослідження – процеси очищення в сепараторах та їх фракційні й інтегральні показники.

Узагальнену схему дисертаційної роботи наведено на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Схема дисертаційної роботи

Основні результати і висновки по розділу 1

1. Визначена актуальність проблеми очищення аерозольних середовищ в енергетичних установках, яка пояснюється зростаючим значенням аерозольних середовищ у процесах перетворення та отримання енергії в енергомашинобудуванні, хімічній і нафтогазовій промисловості та ін.

2. Розглянуті технології перенесення частинок у градієнтних полях тисків, пульсацій, температур, акустичних коливань в аерозольних технологіях. На основі огляду української та зарубіжної технічної літератури розглянуто технології та сепараційні газоочисні пристрої очищення газів від рідкої фази. Технічна досконалість сепаруючих пристроїв характеризується масогабаритними показниками, витратами енергії на переміщення робочих середовищ та технологічністю.

3. Розглянуто перенесення частинок у градієнтних полях швидкостей, пульсацій тиску, температур, акустичних коливань та визначено технології очищення газів гідродинамічними методами. Установлено, що для очищення стиснутих газів використовують різноманітні силові поля: гравітаційне, інерційні, турбофоретичні, електрофоретичні тощо, вплив яких на ефективність очищення залежить від конструктивних параметрів системи, початкової концентрації та виду забруднень, розподілу фракцій за розмірами. Такі силові поля можна ефективно використовувати для очистки газів у широкому диапазоні тисків.

4. Виконано аналіз сучасних сепараційних технологій очистки аерозольних середовищ для енергетичних установок та виявлено, що одним з напрямів підвищення економічності, екологічності та надійності газотурбінних установок є створення високоефективних сепаруючих поверхонь та сепараторів систем замкнутого циклу, що потребує вдосконалення способів інтенсифікації процесів перенесення полідисперсної фази при очищенні багатофазних сумішей, стиснутого повітря для сучасних енергетичних систем.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ Й СХЕМ ГРАДІЄНТНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Створення узагальнених багаторівневих градієнтних сепараційних аерозольних технологій та їх імплементація в інноваційному ресурсозберігаючому й екологічному обладнанні енергетичних установок забезпечено теоретикоекспериментальним розв'язанням дослідницьких завдань на єдиній методологічній основі. Розв'язання рівнянь математичних моделей градієнтного перенесення в рівнях очищення сепараторів здійснено за допомогою методу контрольного об'єму з використанням сучасного комплексу обчислювальної гідродинаміки.

Експериментальні дослідження газоочисних апаратів енергетичних систем та установок проведено в Національному університеті кораблебудування на спеціально створених стендах у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу з використанням лічильників частинок та фотометрів аерозолів, голографічної інтерферометрії в реальному часі; розрахунок концентрацій дисперсної фази здійснено ваговим методом за допомогою аналітичних фільтрів. При постановці дослідів застосовувалася загальна теорія моделювання та планування експериментів, а при обробці даних і перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

В інноваційних технологічних схемах сепарації аерозольних середовищ перспективно використовувати наступні градієнтні впливи: інерційних сил для очистки від грубодисперсних частинок; турбофоретичних, турбодифузіофоретичних, неізотермічних градієнтів, акустичних, фотофоретичних та інерційних сил для очистки від високодисперсних частинок.

На сьогодні є значна кількість робіт щодо вирішення задач розподілу фаз у багатофазних потоках [2–7]. У цих роботах досить детально досліджено такі способи сепарації, як інерційний, турбо-, дифузіо- та неізотермічне градієнте осадження. Згідно з наведеними даними використання пульсацій дозволяє збільшити значення коефіцієнта уловлювання високодисперсних частинок у порівнянні з режимами течії без пульсацій. Дані про акустичний вплив на осадження високодисперсних частинок відсутні, що потребує виконання відповідних досліджень [142].

2.1 Розробка узагальненої багаторівневої системи та схем градієнтних сепараційних аерозольних технологій

Під *технологічним сепараційним рівнем* мається на увазі різноманітні варіанти комбінування підводу аерозольного середовища та каналів і поверхонь для осадження частинок за рахунок сил різноманітної природи: інерції, градієнтних сил – турбофорезу, акустикофорезу, неізотермічного градієнта, турбулентної дифузії та ін.

На кожному технологічному рівні виконуються розроблені в роботах [22, 23] методи та принципи інтенсифікації осадження грубодисперсних і високодисперсних аерозольних частинок.

Для осадження грубодисперсних частинок за рахунок сил інерції вони зводяться до наступного:

 збільшення швидкості потоку в каналі при обтіканні різноманітних перешкод з оптимальним для розкриття потоку й осадження частинок профілем хвилі;

• збільшення швидкості витікання струменя для підвищення ефективності інерційного осадження частинок і використанням системи струменів, що обтікають плоскі й увігнуті поверхні;

• зниження відстані від зрізу сопел до пластин – поверхонь осадження;

• використання поверхонь осадження з мінімальним значення St_{кр}.

Для інтенсифікації осадження високодисперних частинок необхідно:

• створення градієнтних полів різноманітної природи – турбофорезу, акустикофорезу та теромофорезу в каналах і на поверхнях осадження;

• підвищення рівня турбулентності потоку за рахунок збільшення швидкості та генераторів турбулентності;

• створення акустичних полів за рахунок установлення генераторів акустичних коливань;
• створення неізотермічних градієнтів за рахунок перепадів температур між аерозольним середовищем та поверхнями осадження;

• підвищення рівня турбулізації потоку в примежових шарах поверхонь осадження за рахунок створення відривних зон на поверхнях осадження;

 розміщення в каналі багатофункціональних поверхонь осадження у вигляді сіткових коагуляторів;

• використання інерцйних та гравітаційних уловлювання сил для сіткових скоагульованих частинок рідини, i3 яка видаляється потоком коагуляторів;

• використання в каналах і поверхнях осадження канавок для відводу плівки рідини за рахунок капілярних сил та сил тяжіння.

Багатофункціональність полягає в здатності тіл генерувати мікровихорі і зливати осаджені високодисперсні частинки на поверхнях сіток з винесенням їх потоком у вигляді крупних крапель у великі об'єми рідини за рахунок капілярних сил. Для створення інноваційного ресурсозберігаючого та екологічного обладнання ЕУ на основі сучасних методів та механізмів розроблено узагальну багаторіневі схеми градієнтних аерозольних технологій, яку наведено на рис. 2.1–2.8.

Головною метою розробки схемних рішень багаторівневих градієнтних аерозольних технологій, а також дослідження методів керування ними є спільне використання за наявності в робочій системі істотних градієнтів гідродинамічних і теплофізичних параметрів: температури, тиску, швидкості, щільності та ін. Це достатня умова реалізації принципу.

Необхідною умовою є наявність в аерозольних середовищах мікроакумуляторів, а потім мікрогенераторів або мікротрансформаторів внутрішньої та зовнішньої енергій.

Усі подібні 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 технології можна досягти трьома методами.



Рисунок 2.1 – Багаторівнева схема градієнтних аерозольних технологій

INS	Технологія інерційної сепарації
GTUS	Технологія градієнтної турбофоретичної сепарації
GTFS	Технологія градієнтної неізотермічної сепарації
GAFS	Технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації
-U	Викривлені поверхні
-J	Різні кути атаки
-JU	Викривлені чи плоскі поверхні
-NC	Системи тонких циліндрів
-PL	Тонкі пластини
-FS	Відривні зони
-TD	Поверхні каналу та поверхні осадження
-WS	Однохвильові поверхні осадження
-WCF	Перепад температур між стінками каналу та аерозольним
	середовищем
-FWC	Перепад температур між аерозольним середовищем та стінками
-CNC	Охолоджені багатофункціональні поверхні осадження
-EXEN	Вхідні та вихідні ступені інерційного осадження

Для узагальнення технологій сепарації було використано певні скорочення.

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

Другий метод – напрям 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.



ТА ТУРБОФОРЕТИЧНОЇ (GTUS) СЕПАРАЦІЙ

Рисунок 2.2 – Схемні рішення градієнтних аерозольних технологій з рівнями





Рисунок 2.3 – Схемні рішення градієнтних аерозольних технологій з рівнями інерційної (INS) і неізотермічної (GTFS) сепарацій



Рисунок 2.4 – Схемні рішення градієнтних аерозольних технологій з рівнями неізотермічної (GTUS), турбо- (GTFS) та акустикофоретичної (GAFS) сепарацій



Рисунок 2.5 – Схемні рішення градієнтних аерозольних технологій з рівнями інерційної (INS), турбо- (GTFS) та акустикофоретичної (GAFS) сепарацій



Рисунок 2.6 – Схемні рішення градієнтних аерозольних технологій з рівнями неізотермічної (GTUS), турбо- (GTFS) та акустикофоретичної (GAFS) сепарацій



Рисунок 2.7 – Схемні рішення градієнтних аерозольних технологій з рівнями іненрційної (INS), неізотермічної (GTUS), турбо- (GTFS) та акустикофоретичної (GAFS) сепарацій



Рисунок 2.8 – Схемні рішення градієнтних аерозольних технологій з рівнями інерційної (INS) сепарації

2.2 Узагальнена математична модель процесу сепарації в аерозольних технологіях. Теоретичні методи досліджень

Для створення високоефективного сепараційного обладнання енергетичних установок потрібне використання інтенсивних технологій розділення, утилізації, очищення, краплеуловлювання в дисперсних багатофазних потоках.

Такі технології базуються на різних способах, що характеризуються сумісними гідродинамічними, тепловими і масообмінними процесами. Коректне моделювання цих процесів дозволяє виявляти резерви їх інтенсифікації, достовірно візуалізувати поведінку окремих частинок у дисперсних багатофазних потоках, аналізувати їх ефективність і синтезувати екологічні та енергоресурсозберігаючі технології.

Тому розробка й апробація узагальненої тривимірної математичної моделі процесу очистки дисперсних багатофазних потоків є актуальною науковотехнічною проблемою не тільки для енергетичних установок, але і для технологічного обладнання.

Процеси очистки моделюються системами диференціальних рівнянь у частинних похідних, що відповідають законам збереження імпульсу, енергії і маси при турбулентному русі в'язкої рідини з умовами однозначності [50, 64]. Модель напружень Рейнольдса дозволяє для врахування анізотропності турбулентної в'язкості вводити в систему рівнянь Навьє–Стокса індивідуальні рівняння транспорту напружень Рейнольдса й рівняння коефіцієнта дисипації.

Це припускає застосування додаткових транспортних рівнянь для розв'язання тривимірних завдань. Моделювання руху окремих частинок виконується за допомогою рівнянь динаміки при дії різних сил [135].

Наявність пакетів прикладних програмних засобів дозволяє числовими методами вирішувати такі системи рівнянь для умов практичних завдань з використанням базових моделей стаціонарної турбулентності [5–7,179].

За результатами досліджень установлено, що похибка розрахунків досягає 10...17 % у порівнянні з експериментальними результатами.

Аналіз результатів розрахунку двовимірних моделей виявляє недостатній рівень інформативності про гідродинамічні, теплові й концентраційні поля, а також траєкторії руху дисперсних частинок у зонах осадження, що заважає інтенсифікувати процеси очистки в належних конструкціях і розробляти нові екологічні та енергоресурсозберігаючі технології розділення, утилізації, очищення та краплеуловлювання. Більше того, в існуючих моделях відсутні комплексні показники способів інтенсифікації очистки, які б ураховували зв'язок інтенсивності з витратами внутрішньої енергії потоку і зовнішніми джерелами енергії.

Математичні моделі процесів очистки дисперсних багатофазних середовищ можливо уявити як сукупність рівнянь.

Рівняння транспорту напружень Рейнольдса ри_іи_ј можуть бути записані у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \overline{u'_i u'_j} \right) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user}, \qquad (2.1)$$

де $\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \overline{u'_i u'_j} \right)$ – частинна похідна за часом; $C_{ij} \equiv \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho u_k \overline{u'_i u'_j} \right)$ – конвективна складова; $D_{T,ij} \equiv -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p} \left(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j \right) \right]$ – турбулентна дифузія; $D_{L,ij} \equiv -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{u'_i u'_j} \right) \right]$ – (— $\partial u_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{u'_i u'_j} \right) \right]$

ламінарна дифузія; $P_{ij} \equiv -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right)$ – утворення напруженості;

 $G_{ij} \equiv -\rho\beta \left(g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta} \right) - \text{утворення виштовхувальної сили; } \phi_{ij} \equiv \overline{p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} -$

напруження тиску; $\varepsilon_{ij} \equiv 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} - дисипація; F_{ij} \equiv -2\rho \Omega_k \left(\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm}\right) -$ утворення

обертання системи; S_{user} – член, що задається користувачем [135].

Рівняння енергії, отримане на базі цієї теорії,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i (\rho E + p) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{\Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \qquad (2.2)$$

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 моделюється шляхом заміни в рівнянні (2.2) ентальпії на концентрацію частинок дисперсного багатофазного потоку [135]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho C)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(D + \frac{\mu_t}{\rho \operatorname{Pr}_{t_D}} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right].$$
(2.3)

Рівняння нерозривності для потоку без джерел частинок при сталій густині рідини має вигляд

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \tag{2.4}$$

Рівняння динаміки руху частинок у газовому потоці можна записати наступним чином [135]:

$$\frac{\partial u_p}{\partial x_t} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_D + F_T + F_a , \qquad (2.5)$$

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;

$$F_{2} = -0.5m_{k}\frac{\overline{\partial u_{k}^{'2}}}{\partial y} - \text{турбофорезу;} \quad F_{3} = \left(\frac{P}{P_{w}}\right)u_{k}\frac{\partial u}{\partial x} - \text{дифузіофоретична;} \quad F_{4} = \frac{2K\upsilon^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_{p}d_{p}(d_{ik}d_{kl})}(\upsilon - \upsilon_{p})$$

– підйомна Саффмана та $\overline{F}_{D} = \frac{18\mu}{\rho_{p}d_{p}^{2}}\frac{C_{D}}{24}$ Re – опору; P_{w} – значення тиску на стінці; p – тиск потоку; d_{p} – діаметр частинки; ρ_{p} – густина частинки; υ_{p} – швидкість частинки; ρ – густина багатофазних сумішей палив підвищеного тиску; υ – швидкість газу; d_{ij} – тензор деформації; K – 2,594; Re = $\rho d_{p} \frac{|u_{p} - u|}{\mu}$ – число Рейнольдса; u – початкова швидкість потоку; u_{p} – швидкість частинки; μ – молекулярна в'язкість потоку [140]; неізотермічне осадження F_{T} для високодисперсних частинок розраховується:

$$F_{T} = \frac{(-12 \ \pi)(\mu \cdot r_{k})(\alpha / \alpha_{k} + C_{t} \cdot l / r_{k})(C_{tm} \cdot l / r_{k})}{(1 + 3C_{m} \cdot l / r_{k})(1 + 2\alpha / \alpha_{k} + C_{t} \cdot l / r_{k})} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y},$$

 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. відповідно; T – температура, К.

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

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

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

$$C_{D} = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + b_1 \,\text{Re}^{b_2} \right) + \frac{b_3 \,\text{Re}}{b_4 + \text{Re}}, \qquad (2.6)$$

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. Способи, які використовувалися при їх моделюванні, детально наведені у [6]. *Моделювання транспорту турбулентної дифузії D_{T,ij}* може бути знайдено за допомогою узагальненої градієнтно-дифузійної моделі Дейлі та Харлоу [132]:

$$D_{T,ij} = C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho \frac{k \overline{u'_k u'_\ell}}{\varepsilon} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_\ell} \right).$$
(2.7)

Проте це рівняння не завжди має однозначний розв'язок, тому найчастіше його спрощують до вигляду

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right).$$
(2.8)

Методика розрахунку турбулентної в'язкості µ, буде розглянута нижче.

Значення $\sigma_k = 0.82$ було отримано Льєном та Лесчзинером шляхом застосування узагальненої градієнтно-дифузійної моделі для випадку плоскої, гомогенної зсувної течії. Як бачимо, воно відрізняється від аналогічного значення в стандартній к–є-моделі, де $\sigma_k = 1.0$.

Моделювання напружень тиску. Лінійна модель напружень тиску

За замовчуванням член, який відображає напруження тиску φ_{ij} , моделюється відповідно до теорій Гібсона–Лаундера, Фу–Лаундера–Лесчзинера і Лаундера.

Класичний метод моделювання Ф_{іі} передбачає наступне розкладання [132]:

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij,1} + \varphi_{ij,2} + \varphi_{ij,\omega} \,. \tag{2.5}$$

«Повільнонапружений» член Ф_{іі,1} моделюється як

$$\varphi_{ij,1} \equiv -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left[\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right], \qquad (2.10)$$

(2.9)

де $C_1 = 1,8.$

«Швидконапружений» член $\phi_{ij,2}$ моделюється як

$$\varphi_{ij,2} \equiv -C_2 \bigg[\Big(P_{ij} + F_{ij} + G_{ij} - C_{ij} \Big) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \big(P + G - C \big) \bigg], \qquad (2.11)$$

де $C_2 = 0,60, P_{ij}, F_{ij}, G_{ij}$ і C_{ij} визначаються з розрахунків. Крім того,

$$P = \frac{1}{2} P_{kk}; (2.12)$$

$$G = \frac{1}{2}G_{kk}; \tag{2.13}$$

$$C = \frac{1}{2}C_{kk}.$$
 (2.14)

Поправка на відбиття від стінок $\varphi_{ij,\omega}$ відповідає за перерозподіл нормальних напружень у пристінній області. У загальному випадку вона знижує напруження, перпендикулярні до стінки, та посилює напруження, що паралельні їй. Цей член моделюється як

$$\begin{split} \varphi_{ij,\omega} &\equiv C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u'_k u'_m} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_i u'_k} n_j n_k - \frac{3}{2} \overline{u'_j u'_k} n_i n_k \right) \frac{C_\ell k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon d} + \\ &+ C_2' \left(\varphi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \varphi_{ik,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \varphi_{jk,2} n_i n_k \right) \frac{C_\ell k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon d} , \end{split}$$

$$(2.15)$$

де $C'_1 = 0,5$; $C'_2 = 0,3$; n_k – складова x_k , перпендикулярна до стінки; d – найменша відстань до стінки; $C_\ell = C_\mu^{3/4} / \kappa$; $C_\mu = 0,09$; $\kappa = 0,4187$ – стала фон Кармана.

Лінійна модель напружень тиску для режимів малих чисел Рейнольдса

У випадку використання RSM-моделі з розширеним моделюванням пристінного шару модель напружень тиску потребує деяких поправок. У рамках цих поправок величини C_1, C_2, C'_1 , C'_2 розглядаються як функції від напруженого

стану Рейнольдса та турбулентного числа Рейнольдса відповідно до теорії Лаундера-Шима [132]:

$$C_1 = 1 + 2,58A\sqrt{A_2} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(0,0067 \operatorname{Re}_t\right)^2 \right] \right\};$$
(2.16)

$$C_2 = 0.75\sqrt{A}$$
; (2.17)

$$C_1' = -\frac{2}{3}C_1 + 1,67; \qquad (2.18)$$

$$C_{2}' = \max\left[\frac{\frac{2}{3}C_{2} - \frac{1}{6}}{C_{2}}, 0\right],$$
(2.19)

де $\operatorname{Re}_{t} = \left(\rho k^{2} / \mu \varepsilon\right)$ – турбулентне число Рейнольдса; параметр *A* і тензорні інваріанти *A*₂ та *A*₃ визначаються зі співвідношень

$$A = \left[1 - \frac{9}{8}(A_2 - A_3)\right]; \tag{2.20}$$

$$A_2 \equiv a_{ik} a_{ki}; \tag{2.21}$$

$$A_3 \equiv a_{ik} a_{kj} a_{ji} \tag{2.22}$$

де a_{ij} – тензор анізотропії напружень Рейнольдса, який визначається як

$$a_{ij} = -\left(\frac{-\rho \overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}}{\rho k}\right).$$
(2.23)

Квадратична модель напружень тиску, запропонована Спезілом, Сардаром і Гаткі, добре зарекомендувала себе при моделюванні ряду типових зсувних течій, включаючи плоскі течії, течії, що обертаються, вісесиметричні розширення та звуження потоку. Підвищена точність моделювання робить її застосування переважним для широкого класу складних інженерних течій, особливо для течій з викривленими лініями струменя [132].

Основне рівняння квадратичної моделі записано нижче:

$$\varphi_{ij} = -(C_{1}\rho\varepsilon + C_{1}^{*}P)b_{ij} + C_{2}\rho\varepsilon \left(b_{ik}b_{kj} - \frac{1}{3}b_{mn}b_{mn}\delta_{ij}\right) + \left(C_{3} - C_{3}^{*}\sqrt{b_{ij}b_{ij}}\right)\rho kS_{ij} + C_{4}\rho k \left(b_{ik}S_{jk} + b_{jk}S_{ik} - \frac{2}{3}b_{mn}S_{mn}\delta_{ij}\right) + ,$$

$$+ C_{5}\rho k \left(b_{ik}\Omega_{jk} + b_{jk}\Omega_{ik}\right)$$
(2.24)

де b_{ij} – тензор анізотропії напружень Рейнольдса, який визначається як

$$b_{ij} = -\left(\frac{-\rho \overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}}{2\rho k}\right).$$
(2.25)

Тензор напружень S_{ij} визначається як

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right).$$
(2.26)

Тензор швидкостей обертання Ω_{ii} знаходиться за формулою

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$
(2.27)

Модельні константи набувають наступних значень:

$$C_1 = 3,4; C_1^* = 1,8; C_2 = 4,2; C_3 = 0,8; C_3^* = 1,3; C_4 = 1,25; C_5 = 0,4.$$

Квадратична модель не потребує поправок, які враховують вплив потоку від стінок, оскільки і без них отримуємо задовільну точність у межах логарифмічного профілю турбулентного примежового шару. Проте при розширеному моделюванні примежового шару вона не застосовується [132].

Низькорейнольдсова ω *напружена модель* – це модель транспорту напружень, основана на рівняннях транспорту ω і LRR-моделі. Ця модель ідеальна для розрахунку вихрових течій та обтікання складними поверхнями.

Модель має деяку подібність до *k*– ω -моделей, оскільки може прогнозувати широкий спектр гідродинамічних явищ. Більше того, граничні умови для шорстких

поверхонь у даній моделі аналогічні таким же у *k*–ω-моделях. Модель використовує наступний варіант розкладання φ_{ij} [132]:

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij,1} + \varphi_{ij,2},$$
(2.28)

звідки

$$\varphi_{ij} = -(C_{1}\rho\varepsilon + C_{1}^{*}P)b_{ij} + C_{2}\rho\varepsilon \left(b_{ik}b_{kj} - \frac{1}{3}b_{mn}b_{mn}\delta_{ij}\right) + \left(C_{3} - C_{3}^{*}\sqrt{b_{ij}b_{ij}}\right)\rho kS_{ij} + C_{2}\rho k \left(b_{ik}S_{jk} + b_{jk}S_{ik} - \frac{2}{3}b_{mn}S_{mn}\delta_{ij}\right) + , \qquad (2.29)$$
$$+ C_{5}\rho k \left(b_{ik}\Omega_{jk} + b_{jk}\Omega_{ik}\right)$$

де b_{ij} – тензор анізотропії напружень Рейнольдса, який визначається як

$$b_{ij} = -\left(\frac{-\rho \overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}}{2\rho k}\right).$$
(2.30)

Тензор напружень S_{ij} і тензор кутових швидкостей Ω_{ij} визначаються з виразів (2.26) і (2.27) відповідно.

Модельні константи набувають наступних значень:

$$C_1 = 3,4; \ C_1^* = 1,8; \ C_2 = 4,2; \ C_3 = 0,8; \ C_3^* = 1,3; \ C_4 = 1,25; \ C_5 = 0,4.$$

Граничні умови стінок у низькорейнольдсових ω напружених рівняннях RSM-моделі задаються таким же чином, що й у рівнянні транспорту *k* із *k*— ω -моделі [132].

Коефіцієнт ю на стінці визначається як

$$\omega_{\omega} = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+, \qquad (2.31)$$

де ω^+ – безрозмірна величина і знаходиться за формулою

$$\omega_{\omega}^{+} = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_{s}^{+}}\right)^{2} & k_{s}^{+} < 25 \\ \frac{500}{k_{s}^{+}} & k_{s}^{+} \ge 25 \end{cases},$$
(2.32)

де

$$k_{s}^{+} = \frac{\rho k_{s} u^{*}}{\mu}, \qquad (2.33)$$

де k_s – абсолютна шорсткість.

Вплив виштовхувальної сили

Породжувальні члени моделюються як

$$G_{ij} = \beta \frac{\mu_t}{\Pr_t} \left(g_i \frac{\partial T}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \qquad (2.34)$$

де \Pr_t – турбулентне число Прандтля для енергії, яке типово береться 0,85 [132]. Формула для розрахунку G_{ij} ідеальних газів

$$G_{ij} = -\frac{\mu_t}{\rho \Pr_t} \left(g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right).$$
(2.35)

Моделювання кінетичної енергії турбулентності

У загальному випадку в рамках RSM-моделі значення *k* знаходиться шляхом визначення сліду тензора напружень Рейнольдса:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}.$$
(2.36)

Для отримання граничних умов для напружень Рейнольдса може бути використане рівняння транспорту *k*, наведене нижче:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho k u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] + \frac{1}{2} \left(P_{ii} + G_{ii} \right) - , \qquad (2.37)$$
$$-\rho \varepsilon \left(1 + 2M_{t}^{2} \right) + S_{k}$$

де $\sigma_k = 0.82$; $S_k - член$, що визначається користувачем.

Рівняння розв'язується шляхом узгодження з рівняннями напружень Рейнольдса. По суті воно ідентичне рівнянню стандартної к–є-моделі [132].

Незважаючи на те, що рівняння (2.37) розв'язується для всіх елементів розрахункової сітки, отримані шляхом його розв'язання, значення *k* застосовуються лише для визначення граничних умов. Для розрахунків у більшості елементів використовуються значення *k*, отримані з рівняння (2.36), хоча в цілому результати розв'язання обох рівнянь часто схожі.

Моделювання коефіцієнтів дисипації

Тензор дисипації ε_{іі} визначається як

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho \varepsilon + Y_M \right), \qquad (2.38)$$

де _{*Y_M* – додатковий член «розширювальної дисипації», який відображає поправки на властивості стисливої рідини та знаходиться на основі моделі Саркара:}

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2, \qquad (2.39)$$

де M_t – турбулентне число Маха, яке в даному випадку визначається як

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}},\tag{2.40}$$

де *а* – швидкість звуку:

$$a \equiv \sqrt{\gamma RT} \ . \tag{2.41}$$

У цілому всі вищеперераховані поправки на стисливість середовища застосовуються лише у випадку, якщо використовується форма закону ідеального газу для стисливого середовища [132].

Скалярне значення коефіцієнта дисипації є знаходиться з транспортного рівняння, подібного до рівняння стандартної *k*–є-моделі [132]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho\varepsilon u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} \right] + + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} \left(P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii} \right) \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^{2}}{k} + S_{\varepsilon}$$
(2.42)

де $\sigma_{\varepsilon} = 1,0$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_{\varepsilon 3}$ – розраховуються як функція локального напряму течії відносно вектора сили тяжіння аналогічно *k*– ε -моделям; S_{ε} – член, який задається користувачем.

Моделювання турбулентної в'язкості

Турбулентна в'язкість µ, розраховується аналогічно *k*-є-моделі:

$$\mu_{t} = \rho C_{\mu} \frac{k^{2}}{\varepsilon}, \qquad (2.43)$$

де $C_{\mu} = 0,09.$

Граничні умови стінок

RSM-модель відрізняється великою кількістю граничних умов, що необхідно задавати. У рамках моделі необхідно задавати граничні умови для окремих напружень Рейнольдса $\overline{u'_i u'_j}$, коефіцієнта турбулентної дисипації є (або швидкості дисипації турбулентної енергії ω) залежно від модифікації моделі. Усі ці значення можуть бути задані за напрямом або ж вирахувані на базі турбулентної енергії і характерного розміру [132].

У пристінних областях значення напружень Рейнольдса і є, як правило, вираховуються за допомогою пристінних функцій.

Граничні умови для напружень Рейнольдса можуть задаватися явно шляхом застосування допущення рівноваги перенесення, нехтування конвекцією та дифузією в рівняннях транспорту напружень.

У місцевій системі координат τ – координата по дотичній; η – координата по нормалі і λ – координата по бінормалі, напруження Рейнольдса в пристінних елементах знаходяться з рівнянь [132]:

$$\frac{\overline{u_{\tau}^{\prime 2}}}{k} = 1,098;$$
(2.44)

$$\frac{\overline{u_{\eta}'^2}}{k} = 0,247; \qquad (2.45)$$

$$\frac{\overline{u_{\lambda}^{\prime 2}}}{k} = 0,655;$$
(2.46)

$$\frac{\overline{u'_{\tau}u'_{\eta}}}{k} = 0,255$$
 (2.47)

Коефіцієнт k знаходиться з рівняння (2.36). Для зручності розрахунків це рівняння розв'язується для всіх елементів розрахункової сітки незважаючи на те, що отримане на його основі значення k використовується лише в пристінних областях. Для розв'язування у віддалених від стінок елементах k знаходиться безпосередньо за значеннями нормальних напружень Рейнольдса. Типово значення напружень Рейнольдса в пристінних областях фіксовані й визначаються рівняннями (2.44)–(2.47), а транспортні рівняння розв'язуються лише в областях об'ємного потоку.

Також напруження Рейнольдса можуть бути знайдені безпосередньо за значеннями зсувних напружень на стінці без використання *k* [132]:

$$\frac{u_{\tau}^{\prime 2}}{u_{\tau}^{2}} = 5.1; \qquad (2.48)$$

$$\frac{\overline{u_{\eta}^{\prime 2}}}{u_{\tau}^{2}} = 1,0; \qquad (2.49)$$

$$\frac{u_{\lambda}^{\prime 2}}{u_{\tau}^{2}} = 2,3; \qquad (2.50)$$

$$\frac{\overline{u'_{\tau}u'_{\eta}}}{u_{\tau}^2} = 1,0, \qquad (2.51)$$

де *u*_т – швидкість тертя, що визначається як

$$u_{\tau} \equiv \sqrt{\frac{\tau_{\omega}}{\rho}}, \qquad (2.52)$$

де τ_{ω} – напруження зсуву на стінці.

У даному варіанті моделі рівняння транспорту *k* не розв'язується.

Умови однозначності поєднують геометричні, фізичні, початкові й граничні умови, які визначають геометричні показники елементів сепараційного обладнання, значення фізичних коефіцієнтів і властивостей фаз, полів швидкості, температури, густини потоку та розподіл частинок за розмірами і швидкостями [132]. При використанні режиму посиленого впливу стінки в пристінній області може бути застосована гранична умова нульового потоку напружень Рейнольдса [132].

Оскільки RSM-модель набагато більш точно моделює ефекти, викликані кривизною течії, вихороутворенням, обертанням потоку, швидкими змінами напруженості течії, то надається перевага її використанню при моделюванні складних течій, ніж моделям з одним або двома транспортними рівняннями.

Проте сфера її застосування однаково обмежена в основному наближеністю моделювання окремих членів її жорстких транспортних рівнянь.

Особливо багато питань викликає моделювання напружень тиску й коефіцієнтів дисипації, саме на них найчастіше припадають похибки моделі.

Тоді транспорне рівняння можна подати у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial x_{k}} (\rho u_{k} \overline{u_{i}' u_{j}'}) = \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left[\frac{\mu_{T}}{\sigma_{T}} \frac{\overline{\partial u_{i}' u_{j}'}}{\partial x_{k}} \right] + \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left[\mu_{L} \frac{\partial}{\partial x_{k}} (\overline{u_{i}' u_{j}'}) \right] - \rho \left[\overline{u_{i}' u_{k}'} \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{k}} + \overline{u_{i}' u_{k}'} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{k}} \right] - 2\mu_{L} \frac{\overline{\partial u_{i}'} \frac{\partial u_{j}'}{\partial x_{k}} \frac{\partial u_{j}'}{\partial x_{k}}.$$
(2.53)

Перші три умови з правої сторони рівняння являють собою перенесення енергії за рахунок дифузії, теплопровідності, дисипації відповідно.

Для врахування неізотермічних параметрів виконано розрахунок конвективного теплоперенесення за допомогою рівняння енергії.

Розрахунок конвективного теплоперенесення ведеться за аналогією для рівняння перенесення напружень Рейнольдса з допомогою рівняння енергії:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i(\rho E) \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha + \frac{C_p \mu_T}{\Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right], \qquad (2.54)$$

де E – повна енергія; α – коефіцієнт теплопровідності; $(\tau_{ij})_{eff}$ – тензор напружень, що розраховується як

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \qquad (2.55)$$

де $\mu_{\text{eff}} = \mu_T + \mu_L$.

2.3 Методи експериментальних досліджень сепараційних аерозольних технологій

Вирішення завдань з інтенсифікації процесів очистки при розподілі фаз у багатофазних потоках виконувалося теоретичними та експериментальними методами. У більшій частині ці методи відносять до фізичного моделювання і дослідження дослідних та промислових зразків. До перших належать роботи, в яких, як правило, використовуються фізичні моделі і методи аналогії при перенесенні теплоти, маси та імпульсу, рівняння динаміки балансу сил при русі частинки, а також умови нерозривності та однозначності: геометричних, фізичних, початкових і граничних. До других методів відносять неконтактні вимірювання. Серед них голографічна інтерферометрія, поверхнева індикація потоку, швидкісна фотозйомка, оптичні вимірювання дисперсності, концентрації частинок в ізотермічних умовах і за наявності теплообміну [142]. У сукупності методи моделювання дають змогу дослідити такі способи сеперації, як інерційний, турбо-, неізотермічний, акустичний. Експериментальні дифузіота дослідження дозволяють отримати умови верифікації даних зі збільшення значення коефіцієнта уловлювання високодисперсних частинок при використанні пульсацій у порівнянні з режимами течії без пульсацій. Додатково визначають оцінки похибки прямих і непрямих способів вимірювання процесу перенесення високодисперсної фази у двофазних газових середовищах.

Завдання при проведенні експериментальних досліджень наступні:

• провести верифікацію результатів теоретичних розрахунків і адекватність моделей;

• експериментально методами голографічної інтерферометрії, оптичними вимірюваннями дисперсності, концентрації фаз і контактної взаємодії обґрунтувати підвищення енергозберігаючих та екологічних показників при інтенсифікації процесів сепарації аерозольних середовищ;

• виконати наукове обґрунтування створення інноваційних градієнтних сепараційних аерозольних технологій для сучасних і перспективних ЕУ;

 довести достовірність отриманих наукових положень результатами експлуатації систем і пристроїв з інтенсифікацією процесів очищення в складі елементів і систем енергетичних установок.

2.3.1 Експериментальна установка для дослідження потоку методом голографічної інтерферометрії

При дослідженні основних характеристик середовищ експериментальних установок та робочих ділянок застосовуються неконтактні методи вимірювання. Серед них голографічна інтерферометрія, поверхнева індикація потоку, швидкісна фотозйомка, оптичні вимірювання дисперсності, концентрації частинок та ін.

Робочі ділянки – це аеродинамічні труби, призначені для дослідження процесів перенесення в одно- та двофазних середовищах в ізотермічних умовах і за наявності теплообміну.

Розробка методів інтенсифікації перенесення дисперсної фази в елементах тепломасообмінного обладнання дозволяє зменшити його габарити та заощадити енергетичні й матеріальні ресурси.

Одним з методів підвищення ефективності відокремлення високодисперсних частинок є використання сіткових гофрованих коагуляторів, які досить детально вивчені в ізотермічних умовах.

Для розробки способів інтенсифікації перенесення частинок у сіткових коагуляторах важливо знати розподіл поля температур у полідисперсному газовому потоці в елементах сепараційного обладнання.

Розподіл температурного поля у робочій ділянці сепараційного обладнання, де мають місце значні градієнти швидкостей та температур, описується диференціальними рівняннями, які розв'язуються скінченнорізницевими методами. На практиці зазвичай застосовують методи, засновані на усередненні системи рівнянь у частинних похідних, що описують універсальні закони збереження маси, енергії, імпульсу в турбулентній системі [155].

Ця система повинна бути доповнена рівняннями стану, а також початковими і граничними умовами. Останнім часом здебільшого використовують сучасні пакети прикладних програм типу, які дозволили числовим методом вирішувати складні практичні завдання газодинаміки.

Для візуалізації гідродинамічної і теплової обстановки в елементах газоочисних пристроїв перспективним є метод голографічної інтерферометрії. Дослідження візуалізації потоку без порівняння з теоретичними розрахунками наведено в роботі [129].

Для верифікації отриманих даних становить інтерес комплексний підхід – одночасне виконання теоретичних розрахунків та їх підтвердження високоякісним експериментом [133].

Якщо між тілом обтікання та газом існує різниця температур, то в газовому потоці виникає температурне поле, яке при малих швидкостях потоку однозначно пов'язане з полем розподілу густини газу.

Вважаючи газ при атмосферному тиску й температурі $T \ge 300 \,\mathrm{K}$ ідеальним, з рівняння Менделєєва–Клапейрона маємо [133]

$$T = \frac{\mu P}{\rho R}, \qquad (2.56)$$

де μ – молярна маса; *P* – тиск газу; ρ – густина газу; *R* – універсальна газова стала.

З іншого боку, густина газу р пов'язана з його показником заломлення *n* співвідношенням Гладстона–Дейла [133]

$$n-1=k\rho, \qquad (2.57)$$

де *k* – стала Гладстона–Дейла.

Підставивши (2.57) у (2.56), одержимо залежність

$$T = \frac{k\mu P}{(n-1)R}.$$
(2.58)

Таким чином, вважаючи тиск *P* при малих швидкостях потоку постійним, одержимо температуру як однозначну функцію від показника заломлення T = T(n), тоді зміна температури $\Delta T = \frac{dT}{dn} \Delta n$ або

$$\Delta T = -\frac{kP\mu}{\left(n-1\right)^2 R} \Delta n , \qquad (2.59)$$

де Δn – зміна показника заломлення газу при зміні його температури на ΔT [133].

Визначення Δn проведено за допомогою інтерферометра, вважаючи, що його зондувальні промені поширюються по ізотермічних прямих лініях, уздовж яких значення n не змінюється.

При зміні показника заломлення середовища на ∆*n* у предметній світловій хвилі інтерферометра стосовно референтної з'явиться фазовий зсув, обумовлений різницею ходу променів [62]:

$$\Delta L = L \cdot \Delta n \,, \tag{2.60}$$

де L – довжина експериментальної ділянки.

На картині інтерференції максимуми освітленості одержимо для областей, де різниця ходу ΔL дорівнює цілому числу N довжин хвиль випромінювання λ, тоді

$$\Delta n = \frac{N\lambda}{L}; \tag{2.61}$$

$$\Delta T = \frac{k\mu P\lambda}{(n-1)^2 RL} N. \qquad (2.62)$$

Залежність (2.62) пов'язує збільшення температури з порядком інтерференційної смуги на інтерферограмі. Знак «—» у (2.62) опущений, тому що *N* визначається з точністю до знака.

Беручи $k = 0,226 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $P = 1,03 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $R = 8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$, $n - 1 = 2,92 \cdot 10^{-4}$, $L = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, одержимо, що ціна однієї інтерференційної смуги складає 11 °C. Експеримент проводився шляхом реєстрації інтерферограм у реальному часі. Оптична схема установки подана на рис. 2.9 [129].



Рисунок 2.9 – Оптична схема установки:

1 – лазер; 2, 7, 8, 11 – лінзи; 3, 5, 6, 14 – дзеркала; 4 – світлорозподільна пластина; 9 – робоча ділянка; 10 – фотопластина; 12 – экран; 13 – фотокамера

Промінь оптичного квантового генератора 8 (гелій-неоновий лазер ЛГН-215) направлявся на світлоподільник 9 з коефіцієнтом відбиття 0,5. Відбитий від пластини промінь за допомогою дзеркала 7 та через систему лінз 5 і 6 формував опорний пучок.

Промінь, що пройшов через світлоподільник, відбивається від дзеркала 10 та за допомогою системи лінз 11 і 12 утворює предметний пучок, який проходить через досліджувану область 13 (сітчасту структуру) та інтерферує з опорним на голограмі 4. Повітряний потік, утворюваний компресором і нагрівником, направлявся соплом 14 на досліджувану область. Зображення інтерферограми за допомогою лінз 2 та 3 проектується на екран [129].

Для реєстрації зображення при відсутньому екрані використовується цифрова камера 1. Програмний комплекс оцифрування інтерферограм вирішує завдання визначення кількості смуг *N*, що пройшли через кожний піксель зображення інтерферограми на кінограмі.

Реконструкція вільної від паразитних смуг інтерференційної картини здійснюється методом комп'ютерної попіксельної обробки зображень у реальному часі [129].

Алгоритм зводиться до обчислення нормованого до одиниці значення яскравості *I* кожного пікселя зображення зі співвідношення [133]

$$I = 0,5(1 + \cos(N\pi)). \tag{2.63}$$

Дослідження методом голографічної інтерферометрії виконане на універсальній експериментальній установці, що розроблена у НУК.

Він заснований на фіксації на кінограмах зміни розподілу густини газу р, що визначає показник заломлення світла *n* і пов'язана з ним співвідношенням

$$dn/dt = -K_{\Pi} M p / RT^2, \qquad (2.64)$$

де T – абсолютна температура, К; p – тиск, Па; M і R – відповідно молекулярна маса газу, кг/кмоль, і універсальна газова стала, Дж/(кмоль·К); $K_{Д}$ – стала Гладстона– Дейла, що залежить від властивостей газу; t – час, с.

У газових потоках при числах Прандтля, близьких до одиниці, спостерігається аналогія між гідродинамічними та тепловими процесами [129]. У цьому випадку за характеристиками теплового пристінного шару можна робити висновки про гідродинамічний пристінний шар.

Температурне поле в шарі при *p* = const однозначно характеризує як розподіл густини газу в ньому, так і зміну показника заломлення.

Тому рівняння (2.64) можна використовувати для вивчення гідродинамічних шарів на неізотермічній поверхні методом голографічної інтерферометрії.

На цій основі розроблені метод і експериментальна установка, що дозволяють візуалізувати та документувати за допомогою швидкісної кінозйомки

в реальному часі процеси в потоках і пристінних шарах, відривних потоках, сіткових коагуляторах та ін.

Робоча аеродинамічна ділянка (рис. 2.10) складається з охолоджуваних сопла *1* і пластини 2 [129].



Рисунок 2.10 – Аеродинамічна робоча ділянка:

сопло; 2 – пластина; 3, 11 – охолоджувачі; 4 – манометр; 5, 9 –
 автотрансформатори; 6 – колектор; 7 – нагнітач; 8 – електронагрівник; 10 –
 координатник; 12 – робочий об'єм

Кріплення дозволяє встановлювати різні сопла (круглі, плоскі, систему сопел та ін.). Сопла забезпечуються охолоджувальною просторовою системою 11, за наявності екрана – охолоджувальним екраном. Між пластиною та екраном установлюється сітковий коагулятор.

Диск 2 охолоджується за допомогою трубчастої спіралі 3. Робоча ділянка має електронагрівник повітря 8 і нагнітач 7. Пластина 2 виконується різної форми й

може розташовуватися відносно сопла 1 під різними кутами (0...90°), причому в усіх випадках вона перебуває в горизонтальній площині над соплом.

Це виключає вертикальні конвективні потоки повітря, які можуть вплинути на кінцеве зображення на екрані. Сопло 1 і нагрівник 8 установлюються на координатнику 10 та з'єднуються гнучким шлангом з вентилятором (нагнітачем) 7. Потужність нагрівника й продуктивність нагнітача регулюються автотрансформаторами 9 і 5. Витрата повітря визначається за перепадом тисків на вхідному колекторі 6 за допомогою мікроманометра 4 типу МКВ-250 [129, 142].

Охолоджувальна вода (15...20 °C) надходить у трубчасту спіраль 3 і об'єм 11; це забезпечує підтримку майже постійної температури стінок сопла та поверхні пластини. Температура поверхні вимірюється хромель-капелевими термопарами. Температура навколишнього повітря за допомогою кондиціонера підтримується в інтервалі 15...20 °C.

Пластину 2 обтікає потік гарячого повітря з температурою 90...150 °C, що надходить із сопла *1*. На поверхні пластини утворюється тепловий пристінний шар, повітря в ньому має різну густину, що змінюється відповідно до температури або внаслідок підвищення тиску.

Система "сопло–пластина" утворює робочий об'єм ділянки 12. Усі елементи оптичної схеми закріплюються в тримачах, які дозволяють повертати їх у двох взаємно перпендикулярних площинах. Елементи встановлюються на віброзахищеній плиті разом із системою "сопло–пластина" [129].

Швидкісна кінокамера дозволяє документувати розвиток основних процесів у часі при різних швидкостях витікання та відстанях від сопла до пластини. Динаміка процесу вивчалася переглядом кіноплівки на кінопроекторі, а також за кінограмами інтерферограм.

Необхідно виконати наступні основні етапи: виділення області обробки на кінограмі, нормалізація яскравості смуг по всій кінограмі шляхом переведення кольорового зображення в градації сірого та підвищення контрастності, визначення кількості смуг, які пройшли через кожну точку обраної області, побудова вільної від паразитних смуг інтерференційної картини згідно зі співвідношенням (2.64).

Згідно з методами оптичних вимірювань випливає, що інтерферограми являють собою ізолінії різниці показників заломлення лазерного променя досліджуваного середовища (предметний пучок) і повітря (опорний пучок).

Ураховуючи, що показник заломлення повітря практично постійний, то лінії інтерферограм відповідають ізолініям показника заломлення лазерного пучка в потоці, що вивчається [129, 142].

2.3.2 Експериментальний стенд для дослідження сепараторів аерозолів з підвищеною концентрацією рідкої фази

Принципова схема стенда для досліджень процесів очищення дисперсних двофазних середовищ наведена на рис. 2.11 [153]. Стенд містить наступні основні елементи: високонапірний електровентилятор (повітродувка) 1 з електродвигуном витратомірний колектор 2; мікроманометри чашкового 3: типу 4, 29; мікроманометри диференціальні цифрові 5, 17, 28; електронагрівники повітряні 6; автотрансформатори змінного струму 7, 43, 67; цифрова фотокамера 9; цифровий мікроскоп 10; ділянка прогріву повітря 11; труба розподілу гарячого повітря і створення пінного шару 12; персональні комп'ютери 8, 15, 16, 38; термопари 13, 24, 45, 59, 62; аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) 14; фотометричний лічильник аерозольних частинок 18; 19 – перемикач для лічільника; крани кульові подачі проби суміші 20; алонжі з аналітичними фільтрами АФА 21, 23; аспіратор 22; зонди відбору статичного тиску 25, 55; інерційні зонди 26, 53; пробовідбирачі маслоповітряного середовища 27, 52; регульований електроклапан 30; заслінка регулювання витрати повітря 31; витратомірна шайба 32; вихідна робоча вимірювальна ділянка 33; досліджуваний масловіддільник 34; трубопровід зливу 35; триходовий кран 36; аналітичні цифрові ваги 37; трубопровід масла підведення масла в мірну ємність 39; мірна ємність 40; цифрові ваги 41; маслобак 42; електронагрівники водяні 44, 50, 68; кульовий кран дозування стиснутого 46; трубопровід подачі масла з маслобака 47; трубопровід подачі повітря стиснутого повітря 48; генератор високодисперсного масляного аерозолю 49; форсунка подачі стиснутого повітря 51; мікроманометр водяний U- подібний 54; електрокомпресор стиснутого повітря 56; насос подачі масла у форсунку генерації грубодисперсного аерозолю 57; трубка подачі високодисперсного аерозолю 58; вхідна робоча вимірювальна ділянка 60; кульовий кран дозування масла 61; витрати 63; форсунка розпилювання ротаметр для визначення масла грубодисперсних крапель масла 64;





гравітаційний віддільник масла від повітря 65; камера першого генератора утворення високотемпературного маслоповітряного середовища 66; трубопровід підведення 69 і відведення охолоджуючого теплоносія (води) 70 із кранами 71 і ротаметром 72.

Стенд являє собою аеродинамічну трубу відкритого типу, забезпечену засобами вимірювання, обробки результатів, а також регулювання та контролю.

Багатофазне середовище для дослідження характеризується полідисперсним складом та містить високодисперсні частинки еквівалентним діаметром менше 20 мкм (включаючи конденсаційного походження менше 1 мкм), грубодисперсні частинки еквівалентним діаметром 20...500 мкм і пари речовин.

Концентрація частинок у повітрі склала 0,5...2,0 кг/м³, температура середовища до 120 °С.

Високонапірний вентилятор (повітродувка) *1* забирає зовнішнє повітря через витратомірний колектор (лемніскату) *2* і направляє його для підігріву в ділянку прогріву *11*, де розташовані електронагрівники *6*.

У цій ділянці температура повітря підвищується до 80...120 °С.

Витрата повітря визначається за перепадом на лемніскаті 2 і витратомірним колектором 32 за допомогою чашкових мікроманометрів 4 і 29, а також диференціальних цифрових мікроманометрів 5 і 29, приєднаних до персонального комп'ютера 16.

Витрата повітря регулюється краном *31* із заслінкою *30*. Для створення значних концентрацій високодисперсного аерозолю із середнім діаметром частинок менше 2 мкм використовується спеціальний генератор *49*.

Генератор високодисперсного аерозолю дозволяє отримувати частинки із середнім діаметром 0,3 мкм і концентрацією до 300 мг/м³.

Модельне двофазне високотемпературне полідисперсне середовище створюється подачею у вхідну вимірювальну ділянку 60 аерозолю від трьох

генераторів: з камери 66, форсунок 64 і розпилювача високодисперсного аерозолю 58.

Для оцінки основних параметрів аерозольного середовища є відповідні вимірювальні засоби.

Температура суміші вимірюється за допомогою хромель-копелевої термопари 59, яка для автоматизації обробки інформації через аналогово-цифровий перетворювач 14 підключена до персонального комп'ютера 15.

У вимірювальній вхідній ділянці всі чутливі елементи приладів розташовані на відстані не менше трьох діаметрів трубопроводу від перетину розпилювачів аерозолю.

Статичний тиск вимірюється за допомогою сферичної насадки 55 або отворів відбору статичного тиску на стінках трубопроводу (для режиму сухої продувки), а також водяного мікроманометра 54 чи диференціального цифрового мікроманометра 17, приєднаного до персонального комп'ютера 16.

При відборі статичного тиску передбачене установлення розширеного бачка 65. Оцінка дисперсного складу крапель у потоці здійснюється за допомогою інерційного зонда 53. Обложені на стеклах аерозолі вивчалися на цифровому мікроскопі 10, який підключений до персонального комп'ютера 8. Для зручності також використовувалася цифрова камера 9.

Концентрація аерозолю визначалася шляхом пропускання суміші, яка забирається пробозабірником 52, виконаного у вигляді трубки повного тиску, через аналітичні фільтри АФА, розташовані в алонжі 21.

Вимірювання витрати повітря через фільтр здійснювалося за перепадом тиску на вимірювальному колекторі 2.

2.3.3 Експериментальний стенд для досліджень очистки високодисперсних аерозольних середовищ

Відпрацьовування конструктивного виконання очисників дисперсних двофазних газових середовищ і перевірка їх ефективності здійснювалися на спеціальних експериментальних стендах. Для зниження витрат доцільно відпрацьовувати очисники на спеціальному стенді, в якому імітуються умови роботи енергетичних систем і утворення високодисперсних аерозольних середовищ [156].

Крім цього, стенд повинен бути оснащений засобами регулювання витрати, концентрації дисперсної фази, температури дисперсного двофазного середовища та їх визначення.

Для дослідження очисників дисперсних двофазних газових середовищ важливим моментом є вибір модельного аерозольного дисперсного двофазного середовища, яке відповідало б параметрам і характеристикам аерозольних середовищ енергетичного устаткування й різних систем.

Застосування таких середовищ на експериментальних стендах є важливим моментом у відпрацьовуванні проточної частини створюваних очисних пристроїв. Аналіз умов утворення й складу дисперсних двофазних середовищ в енергетичному устаткуванні показав, що як модельне середовище доцільно використовувати аерозольне середовище у вигляді високодисперсного масляного аерозолю.

Масляні аерозолі утворюються в системах суфлювання газотурбінних двигунів, системах вентиляції картера двигунів внутрішньго згорання, вентиляції редуктора головних турбозубчатих агрегатів, вентиляції маслобаків систем атомних електростанцій та ін. Вони являють собою дисперсні двофазні середовища (аерозолі) з полідисперсним складом та містять високодисперсні частинки діаметром менше 20 мкм (включаючи конденсаційного походження діаметром менше 1 мкм), грубодисперсні частинки діаметром більше 20 мкм і пари речовин.
Концентрація дисперсної фази (масла) може досягати для систем суфлювання ГТД 0,5…1,5 кг/м³, температура середовища до 120 °С.

Як модельне середовище доцільно вибирати масляні аерозолі з параметрами, близькими до реальних. Для цього слід використовувати спеціальні генератори як грубодисперсного, так і тонкодисперсного масляного аерозолю, які розміщалися на стенді (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Схема експериментального стенда для оцінки сепарації високодисперних аерозолів

Модельне двофазне середовище (масляний аерозоль) створювалося в такий спосіб. Повітря через витратомірний колектор 1 надходив у мірну ділянку 19 і обтікав нагрівник 2, де його температура підвищувалася до 100 °C. Далі повітря перемішувалося з високодисперсним аерозолем, що надходить з генератора з розпилювачем 3.

Витрата високодисперсного аерозолю (із середнім діаметром крапель 1...30 мкм) регулювалася кількістю подаваного стиснутого повітря від компресора 21 і автотрансформаторами 20. Витрата повітря через ділянку регулювалася заслінкою 12, розташованою після нагнітача 11. У ділянці 19 установлені термопара 4 та пробозабірник у вигляді трубки повного тиску 5. Далі розташовувався газоочисник із плоским коагулятором 13, вхідний і вихідний патрубки якого з'єднувалися з вимірювальною ділянкою 19. Перепади тисків на колекторі 1 і опір газоочисника вимірялися мікроманометрами 18 і 6, 10 трубла виходу, 14 сепараційний елемент.

Для вимірювання концентрації масла в повітрі використовувалися аспіратор 9 з алонжами й торсійні аналітичні ваги 17. У робочу ділянку подавалася холодна вода через патрубок 7, а видалялася через патрубок 8. Уловлена рідина зливалася в мірну ємність 15 по патрубку 16. Підключення генераторів ультразвуку здійснювалося через вводи 7, 8.

Оптичні вимірювання дисперсності й концентрації частинок проводилися за допомогою фотоелектричного лічильника аерозольних частинок АЗ-5 і фотометра аерозолів ФАН-В4.2 УХЛ. Похибка вимірювання цими приладами не перевищувала 5 %. Відбір проб проводився через забірні трубки, що одночасно служили трубками повного тиску 5. При вимірюваннях дотримувалися умов ізокінетичності.

Масова концентрація частинок у потоці обчислювалася відбором проби дисперсного двофазного середовища аспіратором і пропущенням її через аналітичні фільтри АФА. Фільтри АФА зважувалися на аналітичних вагах з похибкою ±0,1 мг до й після взяття проби. За приростом ваги фільтра з урахуванням часу й витрати проби газу визначалася концентрація частинок.

Метою стендових випробувань було визначення залежності коефіцієнтів очищення (сумарного й фракційного) від крапель масла, аеродинамічного опору очисника від витрати середовища, її температури та ін. Як робоча рідина використовувалося газотурбінне масло марки MC 4.

Дослідження ефективності уловлювання аерозолів очисниками здійснювалося за аналогією з розробленою методикою проведення вимірювань на експериментальній установці для дослідження уловлювання частинок.

2.4 Методика проведення вимірювань. Оцінка похибки вимірювань

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.

Масова концентрація частинок у потоці обчислювалася відбором проби дисперсного двофазного середовища аспіратором і пропусканням її через аналітичні фільтри АФА.

Фільтри АФА зважувалися на аналітичних вагах з похибкою 0,2 мг до і після взяття проби. За приростом фільтра з урахуванням часу і витрати проби газу визначалася концентрація частинок за формулою [137]

$$C = 1000(m_{\rm BX} - m_{\rm BHX}) / g_{\rm IIP} \tau.$$
 (2.65)

Витрата маслоповітряного середовища визначалася за перепадом тисків на витратомірних колекторах, виконаних у вигляді профілю Лемніскат [137]:

$$G_g = \alpha_K S_K \sqrt{\frac{2}{\rho} 9,81(p_1 - p_2)}$$
, (2.66)

де $\alpha_K = 0,99$ – коефіцієнт витрати; S_K – прохідний переріз колектора, м²; ρ – густина середовища, кг/м³; $(p_1 - p_2)$ – різниця статичного тиску навколишнього середовища і статичного тиску в колекторі, мм вод. ст.

Ефективність уловлювання аерозолів досліджуваними елементами обчислювалася за формулою

$$\eta_{\Sigma} = (1 - C_{\text{BUX}} / C_{\text{BX}}) \cdot 100 \ \%. \tag{2.67}$$

Коефіцієнт фракційної ефективності очищення визначався за допомогою лічильника аерозольних частинок АЗ-5 наступним чином [137, 141]:

$$\eta_i = (1 - N_{iBMX} / N_{iBX}) \cdot 100 \%.$$
(2.68)

Перепад тисків (аеродинамічний опір масловіддільника) обчислюється за перепадом тисків на вході $p_{\text{вх}}$ і виході $p_{\text{вих}}$ з робочої ділянки за допомогою манометра й трубок повного тиску, які одночасно виконують функцію пробовідбирачів, за формулою [137]

$$p = p_{\text{BMX}} - p_{\text{BX}}.$$

Швидкість осадження частинок на поверхні за рахунок спільної дії всіх сил розраховувалася так:

$$U_{TT} = q_x / C_{\rm BX} = C_{\rm y_{\rm I}} G_g / S_K C_{\rm BX}.$$
(2.70)

Для визначення швидкості осадження крапель за рахунок ультраефектів U_{TT} визначалися швидкості відповідно до звукового впливу на канал U_{0d} і без U_{d} . Різниця між ними виражає середню швидкість осадження за рахунок ультраефекту [137]:

$$U_{TT} = U_{0d} - U_d \,. \tag{2.71}$$

У процесі експериментальних досліджень здійснювалися як прямі, так і непрямі вимірювання. Вибрані методи вимірювання дозволяли враховувати систематичну складову похибки; значення випадкової складової похибки визначалося класом точності застосовуваних приладів. Тому випадкові похибки прямих вимірювань знаходилися за метрологічними характеристиками приладів. Так, абсолютна похибка визначення зміни маси аналітичних фільтрів на вагах типу ВРЛ склала 0,5 мг.

Перепад тисків на чашкових манометрах визначався з абсолютною похибкою 0,02 мм вод. ст., мікроманометра типу МКВ – 0,01 мм вод. ст., U-подібного манометра – 0,5 мм вод. ст.

Відносна похибка визначення рахункової кількості частинок фотоелектричним лічильником АЗ-5 і фотометром аерозолів ФАН У4.2 склала 5 % [137].

Похибка непрямих вимірювань залежить від точності прямих вимірювань та виду функціональної залежності.

Числові значення середньої квадратичної похибки розраховувалися за залежністю

$$\sigma_{y} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial X_{1}}\right)^{2} \sigma_{1}^{2} + \left(\frac{\partial f}{\partial X_{2}}\right)^{2} \sigma_{2}^{2} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_{m}}\right)^{2} \sigma_{m}^{2}\right]}, \qquad (2.72)$$

де $\left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)$ – частинна похідна функціональної залежності непрямого вимірювання по

 X_i (*i*=1...*m*); σ_i – середня квадратична похибка результату вимірювання величини X_i .

Непряме вимірювання витрати повітря за формулою (2.72) має відносну похибку 3,5 %, а вимірювання швидкості осадження частинок – 4,5 %.

Відносна похибка непрямого вимірювання концентрації частинок склала 3 % [137].

Основні результати і висновки по розділу 2

1. Розроблено узагальнені багаторівневі системи, що є різноманітними варіантами комбінування підведення аерозольного середовища до каналів і поверхонь для осадження частинок за рахунок сил різноманітної природи: інерції, градієнтних сил – турбофорезу, акустикофорезу, неізотермічного градієнта, турбулентної дифузії та ін.

2. Розроблені схемні рішення багаторівневих градієнтних аерозольних технологій, основані на використанні градієнтів гідродинамічних і теплофізичних параметрів: температури, тиску, швидкості, густини тощо.

3. Розроблено перший рівень (Технологія інерційної сепарації) багаторівневої схеми градієнтних аерозольних технологій, яка використовується: у каналі при обтіканні потоком різноманітних викривлених поверхонь; при обтіканні поверхонь струменем під різними кутами атаки; при обтіканні викривлених чи струменів; обтіканні плоских поверхонь системами У каналах при багатофункціональних поверхонь із систем тонких циліндрів; у каналах при обтіканні тонких пластин з виступами на рівні примежових шарів; у каналах при обтіканні поверхонь у відривних зонах.

4. Розроблено другий рівень (Технологія градієнтної турбофоретичної сепарації) багаторівневої схеми градієнтних аерозольних технологій, яка використовуєстья: у багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляційних гофрованих сітках); відривних зонах у примежових шарах; на поверхнях каналів та поверхонь осадження за рахунок турбулентної дифузії.

5. Розроблено третій рівень (Технологія градієнтної неізотермічної градієнтної сепарації) багаторівневої схеми градієнтних аерозольних технологій, яка використовується: на поверхнях каналів за наявності перепаду температур між стінками каналу та аерозольним середовищем; на поверхні каналів за наявності перепаду температур між аерозольним середовищем та стінками; на охолоджуваних багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляторах з

гофрованих сіток).

6. Розроблено третій рівень (Технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації) багаторівневої схеми градієнтних аерозольних технологій, яка використовується: у вхідних та вихідних ступенях інерційного осадження; каналах з багатофункціональними поверхнями осадження; каналах з однохвильовими поверхнями осадження.

7. На основі багаторівневевої технології сепарації розроблено схемні рішення: з рівнями інерційної і турбофоретичної сепарацій; з рівнями інерційної і неізотермічної градієнтної сепарацій; з рівнями інерційної, неізотермічної і турбофоретичної сепарацій; з рівнями інерційної, турбо- та акустикофоретичної сепарацій; з рівнями інерційної, неізотермічної, турбо- та акустикофоретичної сепарацій; з рівнями неізотермічної, турбо- та акустикофоретичної

8. Розроблена узагальнена математична модель процесу сепарації в аерозольних технологіях, яка складається із системи диференціальних рівнянь (індивідуальні рівняння транспорту напружень Рейнольдса) у частинних похідних, що відповідають законам збереження імпульсу, енергії і маси при турбулентному русі в'язкої рідини з умовами однозначності.

9. Вирішення завдань з інтенсифікації процесів очистки при розподілі фаз у багатофазних потоках виконувалося теоретичними методами — фізичні моделі і методи аналогії при перенесенні теплоти, маси та імпульсу, рівняння динаміки балансу сил при русі частинки та експериментальними методами на розроблених дослідних стендах — голографічна інтерферометрія, поверхнева індикація потоку, швидкісна фотозйомка, оптичні вимірювання дисперсності, концентрації частинок.

РОЗДІЛ З

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЕРЦІЙНОГО І ТУРБОФОРЕТИЧНОГО РІВНІВ ГРАДІЄНТНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

3.1 Візуалізація технологічних процесів обтікання струминним потоком поверхонь за допомогою голографічної інтерферометрії в реальному часі

Отримано дані експериментальних досліджень з візуалізації газодинамічних і теплофізичних параметрів потоку в багатофунціональних поверхнях [129, 149]. У результаті досліджень були отримані кінограми термогідрограм (інтерферограм, 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 наведені на рис. 3.1 – 3.4.



Рисунок 3.1 – Кінограми інтерферограм (термогідрограм) обтікання пластини плоским неізотермічним турбулентним потоком і трасовані дані експерименту. Частота зйомки 2000 кадрів на секунду. Вхідні дані: $U_0 = 1$ м/с; $d_0 = 50$ мм; h = 50 мм; y = 25 мм; $T_{inlet} = 100$ °C; $T_{wall} = 20$ °C



Рисунок 3.2 – Кінограми інтерферограм (термогідрограм) обтікання пластини плоским неізотермічним турбулентним потоком і трасовані дані експерименту. Частота зйомки 2000 кадрів на секунду. Вхідні дані: *U*₀ = 7 м/с; *d*₀

= 50 mm; h = 50 mm; y = 25 mm; $T_{inlet} = 100$ °C; $T_{wall} = 20$ °C

Межі потоку видно у вигляді темних і світлих смуг, які відповідали ізотермам. Через тривимірність потоку межі досліджуваної області розмиті, що не кількісні полів дозволяє робити розрахунки температур. Отримані термогідрограми здійснити візуалізацію неізотермічного дозволяють високотурбулентного потоку. Перегляд динаміки процесу на кінопроекторі підтвердив характер масообміну: досліджувана зона пульсує, викидаючи великі об'єми газу, що заповнюють майже весь переріз каналу. Наведені термогідрограми для випадку плоского каналу висотою 10 мм при швидкості потоку 20 м/с, де вже більш чітко видно зміну температури у вигляді чергування темних і світлих смуг, вихрові об'єми газу та відривні потоки.



Рисунок 3.3 – Порівняння результатів розрахунків полів температур (*a*) з інтерферограмою (термогідрограмою) (б) у процесі виходу на режим для випадку плоского каналу при *H* = 30 мм і початковій швидкості потоку $U_0 = 20$ м/с



Рисунок 3.4 – Порівняння результатів розрахунків полів температур (*a*) з інтерферограмою (термогідрограмою) (б) у процесі виходу на режим для випадку плоского каналу. Вхідні дані: $U_0 = 45$ м/с; $T_{inlet} = 100$ °C; $T_{wall} = 20$ °C; $U_0 = 45$ м/с; $d_0 = 50$ мм; h = 50 мм; y = 50 мм

3.2 Дослідження технологічних характеристик обтікання поверхонь струменями

На основі проведеного широкого комплексу досліджень струминного обтікання поверхонь, виконаного за допомогою числового моделювання [135] і застосування методу голографічної інтерферометрії в реальному часі [150], були вибрані наступні перспективні варіативні схеми інерційних сопел:

1) нормальне обтікання плоским струменем та вісесиметричним струменем плоскої поверхні (рис. 3.5);

 обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем поверхні під різними кутами (рис. 3.6);

3) обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем увігнутої та опуклої поверхонь під різними кутами (рис. 3.7).

Результати розрахунку гідродинамічної обстановки для варіативних схем на основі наведеної математичної моделі також подані на рис. 3.10–3.12 [148].

Нормальне обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем плоскої поверхні (див. рис. 3.10): *а*) схема плоского струменя; *б*) розрахунок кінетичної енергії турбулентності в плоскому струмені (*a*) при швидкості 30 м/с; *в*) візуалізація методом голографічної інтерферометрії в плоскому струмені (*a*) при швидкості 30 м/с; *г*) схема циліндричного струменя; *д*) розрахунок кінетичної енергії турбулентності в циліндричного струменя; *д*) розрахунок кінетичної енергії турбулентності в циліндричному струмені (*г*) при швидкості 30 м/с; *е*) візуалізація методом голографічної інтерферометрії у циліндричному струмені (*г*) при швидкості 30 м/с; *е*) візуалізація методом голографічної інтерферометрії у циліндричному струмені (*г*) при швидкості 30 м/с; зони струменя: / – вільного; // – градієнтної течії в зоні удару і розвороту; /// – пристінного; *1* – центр течії в зоні розвороту; *2* – зовнішній; *3* – зона розвороту; *4* – зона вихороутворення; *5* – відривний "пузир"; *6* – викиди газу; *7* – повторний відривний "пузир"; *8* – викиди газу.



Рисунок 3.5 – Нормальне обтікання плоским струменем і вісесиметрични струменем плоскої поверхні



Рисунок 3.6 – Обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем плоскої поверхні під кутом



Рисунок 3.7 – Обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем увігнутої та опуклої поверхней

Обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем плоскої поверхні під кутом (див. рис. 3.11): *а*) схема циліндричного струменя під кутом до поверхні осадження; *б*) розрахунок кінетичної енергії турбулентності в циліндричному струмені (*a*) при швидкості 30 м/с; *в*) схема плоского струменя під кутом до поверхні осадження; *с*) розрахунок кінетичної енергії турбулентності в циліндричному струмені (*в*) при швидкості 30 м/с; *1* – центр течії в зоні розвороту; 2 – зовнішній; 3 – зона розвороту; 4 – зона вихороутворення; 5 – відривний "пузир"; 6 – викиди газу; 7 – повторний відривний "пузир"; 8 – викиди газу; 9 – повторний відривний "пузир"; 10 – зона осадження [148].

Обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем увігнутої та опуклої поверхнею (див. рис. 3.12): *а*) схема плоского струменя в увігнутоопуклому каналі; *б*) розрахунок кінетичної енергії турбулентності в плоскому струмені (*a*) при швидкості 30 м/с; *в*) схема плоского струменя в увігнутому каналі; *г*) розрахунок кінетичної енергії турбулентності в циліндричному струмені (*в*) при швидкості 30 м/с; *1* – центр течії в зоні розвороту; *2* – зовнішній; *3* – зона розвороту; *4* – зона вихороутворення; *5* – відривний "пузир"; *6* – викиди газу; *7* – повторний відривний "пузир"; *8* – викиди газу; *9* – повторний відривний "пузир"; *10* – зона осадження [148].

На рис. 3.8 наведені результати розрахунку розподілу газових потоків у каналі із циліндричним і плоским соплом з направленим струменем під кутом 90° до плоского каналу осадження та їх порівняння з отриманими раніше інтерферограмами течії, що підтверджує достовірність розрахунків. На рис. 3.9 подана схема розподілу газових потоків у каналі із циліндричним соплом з направленим струменем під кутами 30 і 60° до циліндричного й плоского каналів осадження. На рис. 3.10 наведена схема розподілу газових потоків у каналі з плоским соплом з направленим струменем під кутами 30 і 60° до циліндричного й плоского каналів осадження. Ці рішення можна використати в системах інерційних сопел для сепараторів широкого застосування.

На рис. 3.13 подані розрахунки тривимірної геометрії для плоского каналу осадження. На рис. 3.14 наведений розрахунок тривимірної геометрії для увігнутого каналу осадження, на рис. 3.15 -розрахунок тривимірної геометрії для увігнуто-опуклого каналу осадження. Виконаний розрахунок у каналах з різним кутом атаки струменя 30, 60 і 90° показав, що відривні зони зберігаються, проте при малих кутах атаки ефективність осадження частинок за рахунок сил інерції спадатиме внаслідок можливого їх захоплення потоком по лініях струму газу. Здійснено розрахунок розподілу швидкості в каналі і розрахунок кінетичної енергії турбулентності при початковій швидкості струменя 30 м/с для випадків розташування сопла $d_c = 1$ на відстані від стінки 1,0d; 1,5d; 2,0d. Як видно з розрахунків, при відстані від стінки до сопла до 2,0d спостерігаються підвищені значення кінетичної енергії турбулентності, в яких формуються поля осадження та збільшення частинок рідкої фази [148].

На рис. 3.11 подана початкова геометрія робочої області для заданих значень відстані від сопла до стінки 2,0; 4,0; 7,5; 12,0; 15,0; 22,5 мм. Виконаний розрахунок розподілу швидкості й статичного тиску в розрахунковій області при *v* = 30 м/с.

На основі розрахунків тривимірної геометрії для плоского, увігнутого, увігнуто-опуклого каналів осадження в каналах з різним кутом атаки струменя 30, 60 і 90° запропонована розрахункова геометрія з урахуванням габаритів сепараційного обладнання (рис. 3.12).

Застосоване тривимірне моделювання сепараційних градієнтних аерозольних технологій. Створена тривимірна модель для числового експерименту вхідних і вихідних систем інерційних сопел для сепараторів широкого застосування зі швидкостями в соплі від 10...30 м/с [148].



Рисунок 3.8 – Розрахунок розподілу швидкості й кінетичної енергії турбулентності при початковій швидкості потоку в соплі 30 м/с у плоскому каналі. Канал з різним кутом атаки струменя 30, 60 і 90° для випадків розташування сопла $d_c = 1$ на відстані від стінки 1,0d; 1,5d; 2,0d



Рисунок 3.9 – Розрахунок розподілу швидкості й кінетичної енергії турбулентності при початковій швидкості потоку в соплі 30 м/с в увігнутоопуклому каналі. Канал з різним кутом атаки струменя 30, 60 і 90° для випадків розташування сопла $d_c = 1$ на відстані від стінки 1,0d; 1,5d; 2,0d



Рисунок 3.10 – Розрахунок розподілу швидкості й кінетичної енергії турбулентності при початковій швидкості потоку в соплі 30 м/с в увігнутому каналі. Канал з різним кутом атаки струменя 30, 60 і 90° для випадків розташування сопла $d_c = 1$ на відстані від стінки 1,0d; 1,5d; 2,0d



Рисунок 3.11 – Початкова геометрія робочої області для заданих значень відстані від сопла до стінки: 1 – 2 мм; 2 – 4 мм; 3 – 7,5 мм; 4 – 12 мм; 5 – 15 мм; 6 – 22,5 мм; 7–12 – розподіл швидкості в розрахунковій області при v = 30 м/с розрахункових сіток 1–6; 13–18 – розподіл статичного тиску в розрахунковій області при v = 30 м/с розрахункових сіток 1–6



Рисунок 3.12 – Робоча область сепараційного елемента: *а)* розрахункова геометрія; *б)* лінії струменя; *в)* розрахунок швидкості

У процесі побудови враховувалася симетричність початкової геометрії сепараційного елемента відносно двох взаємоперпендикулярних площин.

Розрахункова геометрія вивчалася в стаціонарних умовах зі сталою усередненою швидкістю витікання газового струменя з вхідного сопла $U_0 = 10...30$ м/с і в нестаціонарних умовах осадження та збільшення діаметрів частинок у каналі при мінімальному діаметрі частинок 3 мкм, середньому – 10 мкм і максимальному – 15 мкм для концентрації рідкої фази $C_{\text{вх}} = 100$ г/м³. У результаті досліджень отриманий розподіл векторів швидкості в 3D-елементі сепараційного обладнання при $U_0 = 10$ м/с.

Візуалізація газодинамічної обстановки дозволяє визначити ефективність конструкції та можливість подальшої адаптації, модифікування і підвищення коефіцієнтів уловлювання газоочисників [157, 158].

Як видно з розрахунків, відбувається нерівномірний розподіл газового потоку в робочій ділянці, що інтенсифікує процес осадження полідисперсних аерозолів. За розворотом струменя спостерігається значне підвищення швидкості газового потоку, в зонах підвищеної турбулентності – осадження високодисперсних частинок [148].

Як видно з розрахунків, у газовому потоці утворюються зони інтенсивного вихороутворення (усереднене значення швидкості газу в струминному обтиранні досягає 11,38 м/с) і спостерігаються значні вихороутворення в усій області робочої геометрії.

За розрахунком ліній струменя можна судити про траєкторію руху дисперсних частинок і основні зони осадження.

Виконаний розрахунок осадження і збільшення частинок у нестаціонарних умовах при сталій осередненій швидкості витікання газового струменя з вхідного сопла $U_0 = 10...30$ м/с (табл. 3.1) [148].

Початкові умови						Вине	Збільшення				
U	$T_{\rm bx}$	$C_{\rm bx}$	d_{\min}	$d_{ m mid}$	d_{\max}	dmin.винес	$d_{ m mid. винес}$	<i>d</i> _{тах.винес}	d_{\min} $g_{\mathrm{винес}}$	$d_{ m mid}$ $g_{ m винес}$	$d_{\max} \ g_{\scriptscriptstyle \mathrm{B} \mathrm{u} \mathrm{Hec}}$
м/с	см, °С	г/м ³	МКМ			%			г/год		
10	80	100	3	10	15	95	84	68	5	15	21
15	80	100	3	10	15	93	79	66	6	17	25
20	80	100	3	10	15	92	74	63	8	21	28
25	80	100	3	10	15	91	71	57	9	23	31
30	80	100	3	10	15	89	67	52	11	24	35

Таблиця 3.1 – Розрахунок осадження вхідних і вихідних систем інерційних сопел для сепараторів широкого застосування зі швидкостями в соплі від 10...30 м/с

На основі виконаного широкого комплексу 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 кутами. Їх комбінування дозволяє під різними поверхонь створювати високоефективні інерційні ступені очищення для сепараційних градієнтних аерозольних технологій. Підтверджена ефективність застосування тривимірного моделювання для відпрацювання варіативних схем інерційних сопел сепараційних градієнтних аерозольних технологій зі швидкостями в соплі 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 й збільшення частинок рідкої фази. Виконаний розрахунок осадження та збільшення частинок у нестаціонарних умовах при сталій осередненій швидкості витікання газового струменя з вхідного сопла $U_0 = 10...30$ м/с. Установлено, що мінімальне винесення частинок з вхідних систем інерційних сопел 89 % для частинок 3 мкм при швидкості 3 м/с.

3.3 Дослідження технологічних сепараційних характеристик у каналах з викривленими поверхнями

Для розробки суднових систем очищення повітря від краплинної вологи було досліджено сепаруючий профіль (рис. 3.13) з наступними параметрами:

- $R_1 = (0,05...0,50) \cdot L;$
- $h = (0,5...5,0) \cdot R_1;$
- $R_2 = (0,01...1,00) \cdot L.$

Для дослідження сепаруючих профілів були побудовані розрахункові сітки у тривимірній постановці (рис. 3.14) [144].



Рисунок 3.13 – Схема побудови викривлених поверхонь інерційного осадження (сепаруючих профілів) з різними радіусами кривизни та розмірами:

1-вхід у профіль; 2-зона R_1 ; 3-зона R_2 ; 4-зона R_1 ; 5-зона уловлювання

Було досліджено профіль довжиною 80 мм, кількість відвідних канавок – два зверху профілю та два – знизу профілю (розмір канавки довжина – 3 мм та висота 2 мм), проаналізовано та обрано радіус кривизни профілю – 5, 10, 15, 20, 25 мм.

На основі математичної моделі процесів для розрахунку системи рівнянь було визначено початкові та граничні умови, які дозволили здійснити розрахунок основних параметрів сепаруючого профілю.

Для точності розрахунків використовувався критерій збігу розрахунку 10⁻⁴ для змінних швидкості, вимог нерозривності потоку, кінетичної енергії турбулентності та напружень Рейнольдса [144].

У процесі розрахунку задавалися наступні параметри:

тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі (довжина 80 мм та висота 5...25 мм);

розрахункова сітка побудована з трикутникових сегментів з площею S = $30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$;

параметри середовища – нормальні умови;

– густина газу $\rho_{\Gamma} = 1,225 \text{ кг/м}^3$;

- в'язкість $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$

матеріал стінки каналу – алюміній із шорсткістю 0,1 мм та густиною $\rho_{a\pi} = 2690 \text{ кг/m}^3;$

- мінімальний діаметр частинок 3 мкм;
- середній діаметр частинок 100 мкм;
- максимальний діаметр частинок 150 мкм;
- − концентрація рідкої фази (H₂O) 5, 10, 15, 20 %;
- діапазон швидкостей 5, 10, 15, 20 м/с.

На рис. 3.15 та рис. А.1 – А.8 наведено розподіл швидкості, кінетичної енергії тубулентності, статичного ти динамічного тисків для радіуса каналу – 5, 10, 15, 20, 25 мм при U = 5...20 м/с [144].



Рисунок 3.14 – Розрахункова сітка у тривимірній постановці робочої геометрії сепаруючого профілю



Рисунок 3.15 – Розрахунок розподілу швидкості та статичного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при *U* = 15 м/с

З розрахунків установлено, що найбільш ефективні гідродинамічні характеристики має канал довжиною 80 мм з радіусом 15 мм.

Здійснено розрахунок осадження (табл. 3.2) у серпаруючому профілі при діаметрі частинок 1...3 мкм, концентрації рідкої фази (H₂O) 5, 10, 15, 20 % та діапазоні швидкостей 5, 10, 15, 20 м/с.

При отриманні розв'язання були розв'язані задачі у нестаціонарних умовах з фінальним 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.

Так, при швидкостях 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профілю з радіусом 5 мм складає 36,1...30,2 %. При збільшенні швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази і коефіцієнт осадження спадає до 20,8 %.

При швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профілю з радіусом 10 мм складає 91,9...90,4 %. При збільшенні швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази і коефіцієнт осадження спадає до 51,9 %.

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

При швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профілю з радіусом 20 мм складає 85,6...72,9 %. При збільшенні швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази і коефіцієнт осадження спадає до 50,5 %.

Так, при швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профілю з радіусом 25 мм складає 42,5...31,3 %. При збільшенні швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази і коефіцієнт осадження спадає до 15,9 %.

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

		U = 5	м/с	<i>U</i> = 10 м/с				
<i>R</i> (мм)	5 %	10 %	15 %	20 %	5 %	10 %	15 %	20 %
5	35,7	34,7	35,8	36,1	31,3	31,2	31,4	30,2
10	91,6	91,4	91,3	91,9	94,8	92,8	91,3	90,4
15	99,9	99,9	99,9	99,9	99,6	99,3	99,4	99,1
20	84,3	85,1	85,6	85,5	82,0	78,9	74,4	72,9
25	42,5	42,1	41,9	41,2	32,0	32,5	31,3	31,4
		<i>U</i> = 15	5 м/с	<i>U</i> = 20 м/с				
<i>R</i> (мм)	5 %	10 %	15 %	20 %	5 %	10 %	15 %	20 %
5	25,9	24,8	25,7	26,4	20,8	20,6	20,4	20,2
10	70,9	69,4	68,2	68,3	51,9	50,3	50,5	49,4
15	82,3	82,4	83,5	84,9	74,9	73,5	74,1	73,8
20	61,3	61,6	60,8	60,3	50,5	50,4	49,7	48,4
25	22,7	22,4	21,8	21,4	15,4	15,1	15,9	14,6

Таблиця 3.2 – Розрахунок коефіцієнта осадження в сепаруючому профілі

3.4 Дослідження технологій турбофоретичної сепарації в багатофункціональних поверхнях осадження

Дослідження процесів осадження високодисперсних частинок здійснювалося в нестаціонарних умовах [126]. На рис. 3.16 наведена геометрія розрахункового каналу L = 6,3 мм, H = 3,9 мм, d = 0,5 мм.



Рисунок 3.16 – Геометрія розрахункового каналу L = 6,3 мм, H = 3,9 мм, d = 0,5 мм

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 %.

Проведені дослідження показали впливи гідродинамічних характеристик потоку в коагуляторі осадження при діапазоні швидкостей 1...20 м/с, а також концентрацію дисперсної фази при проходженні коагулятора (рис. 3.17–3.18 та рис. Б.1 – Б.9) [126].



Рисунок 3.17 – Розподіл швидкості в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі

при $U_0 = 5$ м/с, $\tau = 0,01$ с



Рисунок 3.18 – Розподіл швидкості в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при $U_0 = 5$ м/с, $\tau = 0.4$ с

У результаті розрахунку були отримані значення коефіцієнта уловлювання високодисперсних частинок (табл. 3.3 і рис. 3.40) [126].

Таблиця 3.3

Початкова швидкість U ₀ , м/с	Знач	ення коє при попе	фіцієнта речних п	ання С	Середнє значення	Значення коефіцієнта уловлювання без пульсацій		
	%							
1	5,60	5,6	4,40	6,90	6,90	5,88	5,0	
5	21,25	17,5	27,50	30,00	28,75	25,00	22,5	
10	31,25	27,5	31,25	30,00	30,00	30,00	27,5	
15	47,50	35,0	35,00	48,75	31,00	39,45	32,5	
20	48,75	42,5	53,75	41,25	46,25	46,50	42,5	



Рисунок 3.19 – Залежність коефіцієнта уловлювання від початкової швидкості потоку при поперечних пульсаціях сіток гофрованого коагулятора:

– з пульсаціями; – без пульсацій

Основні результати і висновки по розділу 3

1. Отримано дані експериментальних досліджень з візуалізації газодинамічних і теплофізичних параметрів потоку в багатофунціональних поверхнях у вигляді кінограм термогідрограм (інтерферограм, які відображали шукану теплову й гідродинамічну обстановку потоку в каналі) для випадку із циліндричним та плоским каналами з різними висотами й швидкостями витікання 1...25 м/с.

2. На основі проведеного широкого комплексу досліджень струминного обтікання поверхонь, виконаного за допомогою числового моделювання та застосування методу голографічної інтерферометрії в реальному часі, були досліджені перспективні варіативні схеми інерційних сопел: нормальне обтікання плоским струменем та вісесиметричним струменем плоскої поверхні; обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем поверхні під різними кутами; обтікання плоским струменем і вісесиметричним струменем увігнутої та опуклої поверхонь під різними кутами.

3. Підтверджена ефективність застосування тривимірного моделювання для відпрацювання варіативних схем інерційних сопел сепараційних градієнтних аерозольних технологій зі швидкостями в соплі від 10...30 м/с. Установлено, що при відстані від стінки до сопла до 2,0*d* спостерігаються підвищені значення кінетичної енергії турбулентності, в яких формуються поля осадження й збільшення частинок рідкої фази.

4. Виконаний розрахунок осадження та збільшення частинок у нестаціонарних умовах при сталій осередненій швидкості витікання газового струменя з вхідного сопла $U_0 = 10...30$ м/с. Установлено, що мінімальне винесення частинок з вхідних систем інерційних сопел 89 % для частинок 3 мкм при швидкості 3 м/с.

5. Для розробки суднових систем очищення повітря від краплинної вологи було досліджено сепаруючий профіль довжиною 80 мм, кількість відвідних канавок – дві зверху профілю та дві – знизу (розміри канавки: довжина – 3 мм і висота 2 мм), проаналізовано та обрано радіус кривизни профілю 15 мм.

6. Здійснено розрахунок осадження у серпаруючому профілі при діаметрі частинок 1...3 мкм, концентрації рідкої фази 5...20 % та діапазоні швидкостей 5...20 м/с. Так, при швидкостях до 5...10 м/с коефіцієнт осадження для профілю з радіусом 15 мм складає 99,9...99,1 %. При збільшенні швидкості потоку до 20 м/с спостерігається зрив рідкої фази і коефіцієнт осадження спадає до 74,9 %.

7. У результаті розрахунку було встановлено, що найбільш ефективним каналом осадження є канал з радіусом 15 мм та найбільш ефективний діапазон швидкостей 1...10 м/с.

8. Здійснено дослідження гідродинамічних характеристик технологій турбофоретичної сепарації в багатофункціональних поверхнях при діапазоні початкових швидкостей 0,5...7,0 м/с. Вивчення розподілу ступеня інтенсивності турбулентності й кінетичної енергії турбулентності показує, що зниження розміру дроту сітки призводить до створення турбулентності з дрібномасштабними вихорами і підвищеної щільності їх розташування.

9. Здійснено розрахунок розподілу температурного поля в плоскому коагуляторі із 40 рядами сітки з діаметром дроту 0,5 мм при початковій швидкості потоку $U_0 = 3$ м/с. З графіка видно, що при проходженні потоку через коагулятор відбувається зниження температури зі 100 до 35...45 °C.

10. Досліджено технології турбофоретичної 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 %.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕІЗОТЕРМІЧНОГО ТА АКУСТИКОФОРЕТИЧНОГО РІВНІВ ГРАДІЄНТНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

4.1 Дослідження сепараційних неізотермічних технологій багатофункціональних поверхонь за допомогою голографічної інтерферометрії в реальному часі

Згідно з методами оптичних вимірювань випливає, що інтерферограми являють собою ізолінії різниці показників заломлення лазерного променя досліджуваного середовища (предметний пучок) і повітря (опорний пучок). Ураховуючи, що показник заломлення повітря практично постійний, то лінії інтерферограм відповідають ізолініям показника заломлення лазерного пучка в потоці, що вивчається. Відомо, що для газів показник заломлення майже не залежить від тиску (в діапазоні 1...10·10⁵ Па) і залежить від температури. Тому лінії (області) інтерферограм будуть відповідати областям з однаковою температурою, тобто ізотермам середовища. Результати експериментальних досліджень структури потоку слід зіставити з розрахунками ізотерм потоку.

Необхідно виконати наступні основні етапи: виділення області обробки на кінограмі, нормалізація яскравості смуг по всій кінограмі шляхом переведення кольорового зображення в градації сірого та підвищення контрастності, визначення кількості смуг, які пройшли через кожну точку обраної області, побудова вільної від паразитних смуг інтерференційної картини. Зовнішній вигляд інтерфейсу програми обробки показаний на рис. 4.1 [133, 142].


Рисунок 4.1 – Інтерфейс програми обробки

Якщо інтерферограма спостерігається в смугах нескінченної ширини (рис. 4.2), то на ній показані лінії течій, що являють собою в ламінарному потоці ізотермічні лінії [133, 142]. Така картина смуг при обтіканні нагрітим повітрям охолоджуваних елементів сіткової структури наведена на рис. 4.2, *б*. Але визначенню порядків смуг і обчисленню значень температур заважають дві обставини.

По-перше, на інтерферограмі між предметною світловою хвилею та її голографічною копією практично завжди існує неконтрольований фазовий зсув як наслідок фотохімічної обробки та сушіння фотошару. Він призводить до виникнення паразитних смуг, що спотворюють інформативну картину інтерференції (рис. 4.3).

По-друге, невизначеними є знаки номерів смуг і початок їх відліку. Усунути невизначеність знака вдається шляхом настройки інтерферометра на смуги скінченної ширини. Для цього опорна голограма повертається на невеликий кут навколо горизонтальної осі. На інтерферограмі виникає система паралельних горизонтальних опорних смуг, перпендикулярних до напрямку поширення повітряного потоку (рис. 4.3, *a*). При ввімкненні нагрівника картина смуг переміщається й деформується відповідно до зміни температури [133].



Рисунок 4.2 – Інтерферограма обтікання сіткової структури в смугах нескінченної ширини:

а) при кімнатній температурі (спостерігається система паразитних смуг);

б) при нагріванні повітря й охолодженні елементів сітки





Рисунок 4.3 – Інтерферограма обтікання сіткової структури в смугах скінченної ширини:

а) система опорних смуг при кімнатній температурі;

б) при нагріванні повітря й охолодженні елементів сітки

Після стабілізації температурного поля інтерферограма газового потоку набуває вигляду, наведеного на рис. 4.3, *б*. Вона досить наглядно ілюструє

відносний розподіл температур по перетину потоку й дозволяє провести кількісну оцінку різниці температур у будь-якій його точці [133].

Визначення поля абсолютних значень температур за даною інтерферограмою не є можливим, бо вона не містить зображення незбурених ділянок досліджуваного середовища. Крім того, залишається проблема похибки у визначенні порядків смуг, обумовлена паразитними смугами інтерференції.

Усунення проблем досягається шляхом обробки інтерферограм методом комп'ютерної попіксельної обробки зображень у реальному часі [133].

При малій швидкості ламінарного потоку зміна показника заломлення газу залежить тільки від температури. Тому номер інтерференційної смуги *N* у кожній точці інтерферограми дорівнює кількості смуг, що пройшли через неї при плавному підвищенні температури газу (якщо це підвищення є монотонним). Для того щоб провести такий підрахунок, робиться відеозапис інтерферограми в реальному часі від моменту ввімкнення нагрівника до моменту стабілізації поля температур. Окремі кадри зафіксованого відеофайлу подані на рис. 4.4.

Типовий вид залежності яскравості пікселя від номера кадру кінограми наведений на рис. 4.5.

Порядок інтерференції *N*, що відповідає даному пікселю зображення інтерферограми, дорівнює кількості періодів зміни яскравості на цьому графіку (див. рис. 4.5). Дана методика виключає вплив паразитних смуг на результат оцифрування інтерферограми, тому що при визначенні порядків смуг немає прив'язки до нульової смуги.

Оцифрування може бути зроблене як у смугах скінченної, так і в смугах нескінченної ширини [133].

183





Рисунок 4.5 – Типовий вигляд залежності яскравості пікселя від номера кадру

За кінограмою, елементи якої наведені на рис. 4.4, відповідно до даної методики проведено комп'ютерне відновлення (у смугах скінченної ширини) температурного поля в потоці нагрітого повітря, що обтікає охолоджувані елементи сіткової структури. Згідно з викладеною методикою інтерференційні смуги відображають ізотермічні ділянки потоку з кроком у 11°C за температурою. Такі термограми дозволяють отримати високоточну візуалізацію неізотермічного потоку з високою просторовою роздільною здатністю в примежових шарах.

Результати експериментальних досліджень структури потоку слід зіставляти з розрахунками ізотерм потоку. При порівнянні результатів розрахунків полів температур з результатами голографічного експерименту встановлено, що отримані за допомогою кінозйомки термограми в достатній мірі збігаються з даними розрахунків, що підтверджує прийняту фізичну модель процесу. Невеликі відмінності обумовлені неідеальністю експериментальної моделі. Результат визначення поля температур наведений у вигляді набору ізоліній на рис. 4.6, *a*, діаграми температурного градієнта, отриманого в середовищі програмного забезпечення, – на рис. 4.6, *б*, у вигляді графіків за окремими перерізами – на рис. 4.7.

Як видно з рис. 4.6 і 4.7, максимальний градієнт температури спостерігається на перетині лінії 1, який є максимально наближеним до поверхні осадження. Температура шарів повітря 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). По мірі віддалення від сітки відбувається швидке вирівнювання температур унаслідок змішування шарів з холодним повітрям зовнішнього середовища, температура усереднюється і встановлюється на рівні 50 °C [133].



Рисунок 4.6 – Результати комп'ютерної обробки інтерферограм



Рисунок 4.7 – Графіки розподілу температур в окремих перерізах

На рис. В.1–В.10 наведені результати досліджень методом голографічної інтерферометрії полів розподілу швидкості й температури в часовому інтервалі 5...36 с.

4.2 Дослідження сепараційних характеристик акустикофоретичної технології в багатофункціональних поверхнях каналів

Для дослідження ефективності уловлювання дисперсного двофазного середовища в елементі сепараційного обладнання потрібно виконати математичне моделювання процесів осадження дисперсних частинок. При виконанні розрахунків використовуватиметься сучасний, універсальний програмний комплекс, призначений для розв'язання задач механіки рідин і газів [162].

У табл. 4.1 наведені дані для подальшого проведення розрахунків, при цьому дані вибиралися так, щоб можна було провести подальший аналіз впливу того чи іншого з факторів. На основі даних табл. 4.1 було побудовано ряд розрахункових геометрій. Урахувавши вище викладений матеріал, у процесі розв'язання застосовувалася неструктурована сіткова технологія. Результати розробки розрахункових сіток подані в табл. 4.2.

Розрахунки сіток трикутного елемента коагулятора проводилися в двовимірній постановці задачі. У процесі розв'язання використовувалася неструктурована сіткова технологія.

Для точності розрахунків в програмному пакеті застососувався критерій збіжності 10⁻³ для змінних: швидкість, умови нерозривності, кінетична енергія турбулентності та напруження Рейнольдса.

Вхідна концентрація дисперсної фази (аерозольних частинок) складала 100 мг/м³, розрахунковий мінімальний діаметр частинок 1·10⁻⁶ м, а максимальний 3·10⁻⁶ м. Вивчався діапазон початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані та граничні умови для аналізу розділення фаз у рамках комбінованої задачі

Но-	Геом роб ділян	метрія бочої іки, мм	Кількість рядів коагуля-	Діа- метр сіток,	Матема тична	Наявність ультра- звуку,	Почат- кова швид-	Пере- пад темпе-	Діам частин	иетр юк, мм	Концен- трація части-
3/11	Ви- сота	дов- жина	тора	ММ	модель	Гц	м/с	ратур	min	max	нок, мг/м ³
Дослідження каналу з пульсаційним коагулятором											
1	8	24	5	0,5	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-6	100
2	8	24	5	0,5	RSM, DPM	100	0,520	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-6	100
3	8	41	10	0,5	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
4	8	41	10	0,5	RSM, DPM	100	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
5	8	68	20	0,5	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
6	8	68	20	0,5	RSM, DPM	100	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
7	8	98	30	0,5	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
8	8	98	30	0,5	RSM, DPM	100	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
9	8	19	5	0,25	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
10	8	19	5	0,25	RSM, DPM	100	0,520	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-6	100
11	8	41	10	0,25	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-6	100
12	8	41	10	0,25	RSM, DPM	100	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
13	8	68	20	0,25	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	1.10-6	3.10-6	100
14	8	68	20	0,25	RSM, DPM	100	0,520	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-6	100
15	8	98	30	0,25	RSM, DPM	Немає	0,520	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-6	100
16	8	98	30	0,25	RSM, DPM	100	0,520	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-6	100
	i		До	слідженн	ія каналу	з пульсацій	ними сті	нками			
17	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	Немає	5	Немає	1.10-6	3.10-5	100
18	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	10000	5	Немає	1.10-6	3.10-5	100
19	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	Немає	10	Немає	1.10-6	3.10-5	100
20	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	10000	10	Немає	1.10-6	3.10-5	100
21	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	Немає	15	Немає	1.10-6	3.10-5	100
22	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	10000	15	Немає	1.10-6	3.10-5	100
23	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	Немає	20	Немає	1.10-6	3.10-5	100
24	8,5	21	5	0,5	RSM, DPM	10000	20	Немає	$1 \cdot 10^{-6}$	3.10-5	100

Таблиця 4.2 – Розрахункова геометрії каналу з накладеними розрахунковими сітками

Nº	Розрахункова геометрія	Кількість рядів коагулятора	Діаметр сітки, мм	Площа розрахун- кового елемента, м ²
	Геометрія каналу з пульсаційним к	оагулятор	ОМ	
1		5	0,5	30·10 ⁻⁸
2		10	0,5	30·10 ⁻⁸
3		20	0,5	30·10 ⁻⁸
4		30	0,5	30·10 ⁻⁸
5		5	0,25	7,5.10-8
6		10	0,25	7,5.10-8
7		20	0,25	7,5.10-8
8		30	0,25	7,5·10 ⁻⁸
	Геометрія каналу з пульсаційним	и стінками	I	
9	Джерело ультразвукових коливань Джерело ультразвукових коливань	5	0,5	30·10 ⁻⁸

Розрахункова сітка каналу була побудована за допомогою трикутних сегментів площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Геометрія розрахункового каналу L = 24 мм; H = 8 мм: *a*), *б*) розрахункова сітка; *в*) геометрія розрахункової сітки

У табл. 4.3 і 4.4 наведено дані результатів розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляційних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно.

На рис. 4.9 і 4.10 зображено графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлюваня та газодинамічного опору від швидкості в каналі з п'ятьма рядами коагуляційної сітки [136]. Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору (приріст газодинамічного опору складає 0,04...35,00 Па в інтервалі початкової швидкості потоку 0,5...20,0 м/с). У той же час поперечні пульсації значно збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлювааня в діапазоні швидкостей 0,5...5,0 м/с: із 15,00 до 46,31 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с та із 48,07 до 66,69 % при початковій швидкості потоку 5 м/с [136].

Швидкість	Кіл	ькість частино		Перецал		
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	тиску (Па)	
0,5	8551	7268	1283	15,00	5,461251	
1	7723	5778	1945	25,18	15,54276	
3	7862	5433	2429	30,89	84,30612	
5	7990	4149	3841	48,07	122,526	
10	8000	2491	5509	68,86	612,3619	
15	8799	1720	7079	80,45	1243,096	
20	8000	1365	6635	82,94	1984,741	

Таблиця 4.3 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с без пульсацій

Таблиця 4.4 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіл	ькість частино		Перецал	
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	тиску (Па)
0,5	1600	859	741	46,31	5,421223
1	1600	827	773	48,3	15,37073
3	1600	816	784	49,00	62,20527
5	1600	533	1067	66,69	146,906
10	1600	515	1085	67,81	519,441
15	1600	326	1274	79,62	1140,793
20	1600	295	1305	81,56	1949,711

На рис. Г.1 і Г.2 подано розподіл амплітуди швидкостей і статичного тиску в каналі з діапазоном початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с.

Досліджене сепараційне обладнання з пульсаційним коагулятором із 10 рядами сітки діаметром 0,5 мм. Положення сітки подане на рис. 4.11.







Рисунок 4.10 – Графік залежності газодинамічного опору від швидкості в каналі з п'ятьма рядами коагуляційної сітки



Рисунок 4.11 – Положення сітки: *a)* початкове положення (*t* = 0,0001 с); *б)* крайнє положення (*t* = 0,0025 с)

Розрахункова сітка каналу наведена на рис. 4.12.



Рисунок 4.12 – Розрахункова сітка каналу (довжина 41 мм, висота 8 мм)

У табл. 4.5 і 4.6 наведені дані результатів розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляційних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно.

Таблиця 4.5 – Дані розрахунку 10 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні
початкових швидкостей 0,520,0 м/с без пульсацій

Швидкість	Кілы	кість частинс		Перепал тиску	
на вході		на рихолі	упорлених	η_{Σ} (%)	(Па)
и (м/с)	па влоді	па виході	уловлених		(110)
1	2	3	4	5	6
0,5	1018	758	260	25,54	10,80402
0,5	1019	753	266	26,10	10,80402
0,5	1018	755	263	25,83	10,80402
0,5	1023	755	268	26,20	10,80402
0,5	1022	755	267	26,12	10,80402
0,5	1021	752	269	26,35	10,80402
0,5	1017	750	267	26,25	10,80402
0,5	1017	749	268	26,35	10,80402
0,5	1015	746	269	26,50	10,80402
0,5	1014	750	264	26,03	10,80402
		Середі	не значення	26,13	10,80402
1	841	603	238	28,30	30,33539
1	843	604	239	28,35	30,33539

Продовж. табл. 4.5							
1	2	3	4	5	6		
1	841	611	230	27,35	30,33539		
1	845	613	232	27,45	30,33539		
1	848	617	231	27,24	30,33539		
1	846	605	241	28,49	30,33539		
1	839	608	231	27,53	30,33539		
1	843	605	238	28,23	30,33539		
1	841	611	230	27,35	30,33539		
1	843	613	230	27,28	30,33539		
		Середи	не значення	27,76	30,33539		
3	807	453	354	43,87	166,1399		
3	806	454	352	43,67	166,1399		
3	806	452	354	43,92	166,1399		
3	804	453	351	43,66	166,1399		
3	805	451	354	43,97	166,1399		
3	804	451	353	43,90	166,1399		
3	804	451	353	43,90	166,1399		
3	805	453	352	43,73	166,1399		
3	806	452	354	43,92	166,1399		
3	806	454	352	43,67	166,1399		
		Середи	не значення	43,82	166,1399		
5	803	342	461	57,41	377,7282		
5	802	340	462	57,60	377,7282		
5	803	340	463	57,66	377,7282		
5	801	339	462	57,68	377,7282		
5	802	341	461	57,48	377,7282		
5	803	342	461	57,41	377,7282		
5	802	341	461	57,48	377,7282		
5	802	341	461	57,48	377,7282		
5	802	341	461	57,48	377,7282		
5	802	340	462	57,61	377,7282		
		57,53	377,7282				
10	801	188	613	76,53	1221,481		
10	800	187	613	76,62	1221,481		
10	800	187	613	76,62	1221,481		
10	801	187	614	76,65	1221,481		
10	801	188	613	76,53	1221,481		
10	801	188	613	76,53	1221,481		
10	802	188	614	76,56	1221,481		

Продовж. табл. 4.5								
1	2	3	4	5	6			
10	801	188	613	76,53	1221,481			
10	801	188	613	76,53	1221,481			
10	802	189	613	76,43	1221,481			
		Середи	не значення	76,55	1221,481			
15	800	120	680	85,00	2472,323			
15	801	121	680	84,89	2472,323			
15	802	122	680	84,79	2472,323			
15	801	120	681	85,02	2472,323			
15	801	121	680	84,89	2472,323			
15	801	120	681	85,02	2472,323			
15	800	120	680	85,00	2472,323			
15	801	121	680	84,89	2472,323			
15	801	121	680	84,89	2472,323			
15	802	121	681	84,91	2472,323			
		Середи	не значення	84,93	2472,323			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
20	800	73	727	90,87	4169,582			
		Середи	не значення	90,87	4169,582			

Таблиця 4.6 — Дані розрахунку 10 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіль	кість частино	эк (шт.)		Перепал тиску	
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)	
1	2	3	4	5	6	
0,5	1600	393	1207	75,4375	16,4	
0,5	1600	376	1224	76,5	16,4	
0,5	1600	367	1233	77,0625	16,4	

Продовж. та	Продовж. табл. 4.7							
1	2	3	4	5	6			
0,5	1600	389	1211	75,6875	16,4			
0,5	1600	311	1289	80,5625	16,4			
0,5	1600	332	1268	79,25	16,4			
		Серед	нє значення	77,42	16,4			
1	1600	295	1305	81,56	51,58			
1	1600	279	1321	82,56	51,58			
1	2000	335	1665	83,25	51,58			
1	2000	412	1588	79,40	51,58			
1	1600	294	1306	81,62	51,58			
1	1600	236	1364	85,25	51,58			
1	1600	264	1336	83,50	51,58			
		Серед	нє значення	82,45	51,58			
3	1600	299	1301	81,31	169,59			
3	1600	316	1284	80,25	169,59			
3	2000	401	1599	79,95	169,59			
3	1600	334	1266	79,12	169,59			
3	1600	312	1288	80,50	169,59			
3	1600	275	1325	82,81	169,59			
			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					
		Серед	нє значення	80,66	169,59			
5	800	Серед 125	не значення 675	80,66 84,37	169,59 379,7451			
5 5	800 800	Серед 125 130	нє значення 675 670	80,66 84,37 83,75	169,59 379,7451 379,7451			
5 5 5	800 800 800	Серед 125 130 124	нє значення 675 670 676	80,66 84,37 83,75 84,50	169,59 379,7451 379,7451 379,7451			
5 5 5 5 5	800 800 800 800	Серед 125 130 124 137	нє значення 675 670 676 663	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451			
5 5 5 5 5 5	800 800 800 800 1040	Серед 125 130 124 137 215	нє значення 675 670 676 663 825	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33	169,59379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451			
5 5 5 5 5 5 5	800 800 800 800 1040 800	Серед 125 130 124 137 215 112	нє значення 675 670 676 663 825 688	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00	169,59379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451			
5 5 5 5 5 5 5	800 800 800 800 1040 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед	не значення 675 670 676 663 825 688 не значення	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47	169,59379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451			
5 5 5 5 5 5 10	800 800 800 800 1040 800 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед 164	не значення 675 670 676 663 825 688 не значення 636	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50	169,59379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,7451379,74511306,402			
5 5 5 5 5 5 10 10	800 800 800 800 1040 800 800 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед 164 158	н€ значення 675 670 676 663 825 688 н€ значення 636 642	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402			
5 5 5 5 5 5 10 10 10	800 800 800 800 1040 800 800 800 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед 164 158 166	не значення 675 670 676 663 825 688 не значення 636 642 634	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402			
5 5 5 5 5 5 10 10 10 10	800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед 164 158 166 156	нє значення 675 670 676 663 825 688 нє значення 636 642 634 634 644	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,50	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402			
5 5 5 5 5 5 10 10 10 10 10 10 10	800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800 800	Середі 125 130 124 137 215 112 Середі 164 158 166 156 158	нє значення 675 670 676 663 825 688 нє значення 636 642 634 644 642	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,50 80,25	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402			
5 5 5 5 5 5 5 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800 800 800 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед 164 158 166 156 158 157	нє значення 675 670 676 663 825 688 нє значення 636 642 634 644 644 644 643	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,50 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402			
5 5 5 5 5 5 10 10 10 10 10 10 10	800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800 800 800 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед 164 158 166 156 158 157 Серед	не значення 675 670 676 663 825 688 не значення 636 642 634 644 642 643 не значення	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,50 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402			
5 5 5 5 5 5 5 10 10 10 10 10 10 10 10 10	800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800 800 800 800	Середі 125 130 124 137 215 112 Середі 164 158 166 156 158 157 Середі 157 Середі 164	нє значення 675 670 676 663 825 688 нє значення 636 642 634 644 642 643 нє значення 684	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,50 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,25 80,50 80,25 80,50 80,50 80,50 80,50 80,50 80,50 80,50	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,403 1306,404 1306,405 1306,405			
$ \begin{array}{r} 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 1$	800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800 800 800 800	Серед 125 130 124 137 215 112 Серед 164 158 166 156 158 157 Серед 116 95	нє значення 675 670 676 663 825 688 нє значення 636 642 634 644 642 643 н€ значення 643 н€ значення 684 705	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,50 80,25 80,37 80,02 85,50 88,12	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,403 1306,404 2807,614 2807,614			
$ \begin{array}{r} 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 1$	800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800 800 800 800	Середі 125 130 124 137 215 112 Середі 164 158 166 156 158 157 Середі 116 95 111	нє значення 675 670 676 663 825 688 нє значення 636 642 634 644 642 643 нє значення 684 705 689	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,50 80,25 80,25 80,37 80,02 85,50 88,12 86,12	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 1306,402 2807,614 2807,614 2807,614			
$ \begin{array}{r} 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ $	800 800 800 800 800 1040 800 800 800 800 800 800 800 800 800	Середі 125 130 124 137 215 112 Середі 164 158 166 156 158 157 Середі 116 95 111 103	нє значення 675 670 676 663 825 688 нє значення 636 642 634 644 642 643 нє значення 684 705 689 697	80,66 84,37 83,75 84,50 82,87 79,33 86,00 83,47 79,50 80,25 79,25 80,37 80,02 85,50 88,12 86,12 87,12	169,59 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 379,7451 306,402 1306,402 1306,402 1306,402 2807,614 2807,614 2807,614 2807,614			

Продовж. табл. 4.6										
1	2	3	4	5	6					
15	800	115	685	85,62	2807,614					
		86,60	2807,614							
20	800	65	735	91,87	4880,81					
20	800	56	744	93,00	4880,81					
20	800	57	743	92,87	4880,81					
20	800	77	723	90,37	4880,81					
20	800	56	744	93,00	4880,81					
20	800	51	749	93,62	4880,81					
	Середнє значення 92,46 4880,81									

На рис. Г.3 та Г.4 зображені графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання та газодинамічного опору від швидкості в каналі з десятьма рядами коагуляційної сітки.

Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору (приріст газодинамічного опору складає 5,6...711,2 Па в інтервалі початкової швидкості потоку 0,5...20,0 м/с).

У той же час поперечні пульсації значно збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...7,0 м/с: із 26,13 до 77,42 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с та із 68,23до 81,05 % при початковій швидкості потоку 7 м/с.

На рис. 4.27 і 4.28 наведено розподіл амплітуди швидкостей та статичного тиску в каналі з діапазоном початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с.



Рисунок 4.13 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від швидкості в каналі з десятьма рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість у каналі *u* (м/с); *d*_{сітки} = 0,5 мм



Рисунок 4.14 – Графік залежності газодинамічного опору в каналі від швидкості з десятьма рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість у каналі *u* (м/с);

$$d_{\rm citku} = 0,5 \,\,{
m MM}$$

Досліджений робочий канал сепараційного обладнання з пульсаційним коагулятором із 20 рядами сітки діаметром 0,5 мм. Положення сітки наведене на рис. 4.15. Розрахункова сітка каналу подана на рис. 4.16.



Рисунок 4.15 – Положення сітки:

а) початкове положення (t = 0,0001 с); б) крайнє положення (t = 0,0025 с)



Рисунок 4.16 – Розрахункова сітка каналу (довжина 68 мм, висота 8 мм)

У табл. 4.7 і 4.8 наведені дані результатів розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляторних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно.

Таблиця 4.7 – Дані розрахунку 20 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с без пульсацій

Швидкість	Кіль	кість частинс		Перепал тиску	
на вході	на вхолі	на вихолі	уповлених	$\eta_{\Sigma}(\%)$	(Па)
и (м/с)	па вході	па виході	уловлених		(110)
1	2	3	4	5	6
0,5	829	571	258	31,12	21,69171
0,5	841	594	247	29,37	21,69171
0,5	841	579	262	31,15	21,69171
0,5	840	581	259	30,83	21,69171
0,5	844	585	259	30,69	21,69171
0,5	834	575	259	31,05	21,69171
0,5	834	575	259	31,05	21,69171
0,5	845	594	251	29,70	21,69171
0,5	843	587	256	30,37	21,69171
0,5	844	583	261	30,92	21,69171
		Середі	не значення	30,63	21,69171
1	815	557	258	31,66	61,67208
1	810	554	256	31,60	61,67208
1	810	561	249	30,74	61,67208

Продовж. та	абл. 4.7				
1	2	3	4	5	6
1	813	559	254	31,24	61,67208
1	813	547	266	32,72	61,67208
1	806	551	255	31,64	61,67208
1	807	548	259	32,09	61,67208
1	807	559	248	30,73	61,67208
1	800	553	247	30,87	61,67208
1	811	546	265	32,67	61,67208
		Середи	не значення	31,60	61,67208
3	844	465	379	44,90	341,8887
3	842	458	384	45,60	341,8887
3	842	458	384	45,60	341,8887
3	837	453	384	45,88	341,8887
3	833	453	380	45,62	341,8887
3	837	453	384	45,88	341,8887
3	850	466	384	45,18	341,8887
3	850	464	386	45,41	341,8887
3	848	467	381	44,93	341,8887
3	860	481	379	44,07	341,8887
Середнє значення				45,31	341,8887
				/	/
5	806	323	483	59,92	788,4673
5 5	806 806	323 323	483 483	59,92 59,92	788,4673 788,4673
5 5 5	806 806 806	323 323 322	483 483 484	59,92 59,92 60,05	788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5	806 806 806 805	323 323 322 322 322	483 483 484 483	59,92 59,92 60,05 60,00	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5	806 806 806 805 806	323 323 322 322 322 322	483 483 484 483 484	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5 5 5	806 806 806 805 806 807	323 323 322 322 322 322 325	483 483 484 483 484 482	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5 5 5 5	806 806 806 805 806 807 809	323 323 322 322 322 322 325 325	483 483 484 483 484 482 484 484	59,92 59,92 60,05 60,05 59,73 59,83	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5 5 5 5 5	806 806 805 805 806 807 809 808	323 323 322 322 322 325 325 325 325	483 483 484 483 484 482 484 482 484 483	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	806 806 805 805 806 807 809 808 808	323 323 322 322 322 325 325 325 325 318	483 483 484 483 484 482 484 482 484 483 490	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	806 806 806 805 806 807 809 808 807	323 323 322 322 322 325 325 325 325 318 329	483 483 484 483 484 482 484 482 484 483 490 478	59,92 59,92 60,05 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	806 806 805 805 806 807 809 808 808 808 808	323 323 322 322 322 325 325 318 329 Середи	483 483 484 483 484 482 484 482 484 483 484 485 484 483 484 483 484 483 483 490 478 IC ЗНАЧЕННЯ	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 10	806 806 805 805 806 807 809 808 808 808 807 800	323 323 322 322 322 325 325 325 318 329 Середи 178	483 483 484 483 484 482 484 483 484 483 484 483 484 483 484 483 484 483 490 478 622	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91 77,75	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 2573,943
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 10 10	806 806 805 805 806 807 809 808 808 808 808 807 800 800	323 323 322 322 322 325 325 325 318 329 Середи 178 178	483 483 484 483 484 482 484 482 483 490 478 622 622 622	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91 77,75 77,75	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 2573,943 2573,943
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 10 10 10 10	806 806 806 805 806 807 809 808 807 808 807 808 807 808 807 808 800 800 800 800	323 323 322 322 322 325 325 325 318 329 Середи 178 178 178	483 483 484 483 484 482 484 483 484 483 484 483 484 483 490 478 622 622 622 622 622 622	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91 77,75 77,75	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 2573,943 2573,943 2573,943
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 10 10 10 10 10	806 806 806 805 806 807 809 808 808 808 808 807 800 800 800 800 800	323 323 322 322 322 325 325 325 325 325 327 329 Середи 178 178 179	483 483 484 483 484 482 484 483 484 483 484 483 484 483 484 483 490 478 622 622 622 622 622 621	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91 77,75 77,75 77,62	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 2573,943 2573,943 2573,943 2573,943
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	806 806 806 805 806 807 809 808 808 808 808 808 800 800 800 800	323 323 322 322 322 325 325 325 325 325 327 329 Середн 178 178 178 179 179	483 483 484 483 484 482 484 482 484 483 490 478 622 622 622 622 621	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91 77,75 77,75 77,62 77,62	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 2573,943 2573,943 2573,943 2573,943
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	806 806 806 807 809 808 807 808 807 808 807 808 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800	323 323 322 322 322 325 325 325 325 325 327 329 Cереди 178 178 179 179 179 179	483 483 483 484 483 484 482 484 483 484 483 484 483 484 483 490 478 622 622 622 621 621 621	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91 77,75 77,75 77,62 77,62 77,62	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 2573,943 2573,943 2573,943 2573,943
$ \begin{array}{r} 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ $	806 806 806 805 806 807 809 808 808 807 808 807 808 807 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800 800	323 323 322 322 322 325 325 325 325 325 327 329 Середи 178 178 179 179 178 179 179 178	483 483 484 483 484 482 484 482 483 490 478 622 622 622 621 621 622 621 622	59,92 59,92 60,05 60,00 60,05 59,73 59,83 59,78 60,64 59,23 59,91 77,75 77,75 77,62 77,62 77,75	788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 788,4673 2573,943 2573,943 2573,943 2573,943 2573,943

Продовж. табл. 4.7							
1	2	3	4	5	6		
10	800	178	622	77,75	2573,943		
10	800	178	622	77,75	2573,943		
		Середи	не значення	77,71	2573,943		
15	800	111	689	86,12	5271,69		
15	800	111	689	86,12	5271,69		
15	800	111	689	86,12	5271,69		
15	800	108	692	86,50	5271,69		
15	800	110	690	86,25	5271,69		
15	800	111	689	86,12	5271,69		
15	800	111	689	86,12	5271,69		
15	800	110	690	86,25	5271,69		
15	800	111	689	86,12	5271,69		
15	800	111	689	86,12	5271,69		
		Середи	не значення	86,19	5271,69		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
20	800	68	732	91,5	8922,43		
Середнє значення 91,5 8922,43							

Таблиця 4.8 — Дані розрахунку 20 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіль	кість частино	ок (шт.)		Перепал тиску
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)
1	2	3	4	5	6
0,5	1600	129	1471	91,94	22,16912
0,5	1600	85	1515	94,69	22,16912
0,5	1600	113	1487	92,94	22,16912
0,5	1600	143	1457	91,06	22,16912

Продовж. табл. 4.8					
1	2	3	4	5	6
0,5	1600	132	1468	91,75	22,16912
		Середі	не значення	92,47	22,16912
1	1600	108	1492	93,25	58,71006
1	1600	153	1447	90,44	58,71006
1	1600	107	1493	93,31	58,71006
1	1600	103	1497	93,56	58,71006
1	1600	58	1542	96,37	58,71006
		Середі	не значення	93,39	58,71006
3	1600	89	1511	94,44	276,3002
3	1600	91	1509	94,31	276,3002
3	1600	90	1510	94,37	276,3002
3	1600	86	1514	94,62	276,3002
3	1600	92	1508	94,25	276,3002
3	1600	89	1511	94,44	276,3002
		Середі	не значення	94,41	276,3002
5	1600	163	1437	89,81	756,9654
5	1600	135	1465	91,56	756,9654
5	1600	148	1452	90,75	756,9654
5	1600	109	1491	93,19	756,9654
5	1600	100	1500	93,75	756,9654
		Середі	не значення	91,81	756,9654
10	1600	236	1364	85,25	2598,197
10	1600	260	1340	83,75	2598,197
10	1600	264	1336	83,50	2598,197
10	1600	217	1383	86,44	2598,197
10	1600	242	1358	84,87	2598,197
10	1600	278	1322	82,62	2598,197
		Середі	не значення	84,41	2598,197
15	1600	160	1440	90,00	5552,75
15	1600	179	1421	88,81	5552,75
15	1600	179	1421	88,81	5552,75
15	1600	179	1421	88,81	5552,75
15	1600	179	1421	88,81	5552,75
15	1600	179	1421	88,81	5552,75
	1	Середі	не значення	89,01	5552,75
20	800	53	747	93,37	9081,609
20	800	53	747	93,37	9081,609
20	800	53	747	93,37	9081,609

Продовж. табл. 4.8						
1	2	3	4	5	6	
20	800	53	747	93,37	9081,609	
20	800	53	747	93,37	9081,609	
20	800	53	747	93,37	9081,609	
Середнє значення				93,37	9081,609	

На рис. 4.17 і 4.18 зображені графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання та газодинамічного опору від швидкості в каналі із 20 рядами коагуляційної сітки. Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору (приріст газодинамічного опору складає 0,5...159,2 Па в інтервалі початкової швидкості потоку 0,5...20,0 м/с). У той же час поперечні пульсації значно збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...10,0 м/с: із 30,63 до 92,47 % при початковій швидкості потоку 10 м/с [136].



Рисунок 4.17 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від швидкості в каналі із 20 рядами коагуляційної сітки



Рисунок 4.18 – Графік залежності газодинамічного опору від швидкості в каналі із 20 рядами коагуляційної сітки

Досліджений робочий канал сепараційного обладнання з пульсаційним коагулятором із 30 рядами сітки діаметром 0,5 мм. Положення сітки наведене на рис. 4.19. Розрахункова сітка каналу подана на рис. 4.20.

На рис. 4.21 і 4.22 зображені графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання та газодинамічного опору від швидкості в каналі із 30 рядами коагуляційної сітки. Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору (приріст газодинамічного опору складає 0,23...531,8 Па в інтервалі початкової швидкості потоку 0,5...20,0 м/с). У той же час поперечні пульсації значно збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...10,0 м/с: із 42,50 до 96,94 % при початковій швидкості потоку 10 м/с.



Рисунок 4.19 – Положення сітки:

а) початкове положення (t = 0,0001 с); б) крайнє положення (t = 0,0025 с)





У табл. 4.9 і 4.10 наведені дані результатів розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляційних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно.

Таблиця 4.9 – Дані розрахунку 30 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с без пульсацій

Швидкість	Кіль	Кількість частинок (шт.)			
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)
0,5	800	460	340	42,5	31,96659
1	800	433	367	45,87	91,313
3	800	411	389	48,62	511,3097
5	800	318	482	60,25	1175,857
10	800	174	626	78,25	3828,702
15	800	102	698	87,25	7842,648
20	800	55	745	93,12	13316,85

Таблиця 4.10 – Дані розрахунку 30 рядів сіток діаметром 0,5 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіль	Кількість частинок (шт.)			Перепал тиску
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)
0,5	1600	49	1551	96,94	31,74485
1	1600	75	1525	95,31	91,25882
3	1600	30	1570	98,125	573,8014
5	1600	50	1550	96,875	1162,086
10	800	70	730	91,25	3838,565
15	800	74	726	90,75	8104,485
20	800	49	751	93,87	13848,65



Рисунок 4.21 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлення в каналі від швидкості витікання із 30 рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість у каналі *u* (м/с); *d*_{сітки} = 0,5 мм



Рисунок 4.22 – Графік залежності газодинамічного опору від швидкості в каналі із 30 рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість у каналі *u* (м/с);

$$d_{\rm citku} = 0,5$$
 мм

Досліджені робочий канал та робоча геометрія каналу сепараційного обладнання з пульсаційним коагулятором із 5 рядами сітки діаметром 0,25 мм. Розрахункова сітка каналу побудована за допомогою трикутних сегментів площею $S = 7,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ (рис. 4.23).



Рисунок 4.23 – Розрахункова сітка каналу (довжина 19 мм, висота 8 мм)

У табл. 4.11 і 4.12 подані результати розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляторних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно. На рис. 4.24 і 4.25 зображені графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання та газодинамічного опору від швидкості в каналі із 5 рядами коагуляційної сітки. Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору (приріст газодинамічного опору складає 0,4...11,8 Па в інтервалі початкової швидкості потоку 0,5...15,0 м/с). У той же час поперечні пульсації збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...5,0 м/с: із 42,9 до 56,6 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с та із 83,9 до 84,3 % при початковій швидкості потоку 5 м/с. На рис. Г.5 та Г.6 наведені розподіли амплітуди швидкостей 0,5...15,0 м/с.

Таблиця 4.11 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с без пульсацій

Швидкість	Кіль	кість частино	ок (шт.)		Перецал тиску
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)
0,5	800	456	344	42,9	4,6
1	800	349	451	56,3	14,0
1,5	800	314	486	60,8	26,0
2	800	302	498	62,3	40,6
2,5	800	274	526	65,8	57,7
5	800	129	671	83,9	182,0
7	800	79	721	90,1	327,7
10	800	39	761	95,1	623,2
15	800	13	787	98,4	1321,3

Таблиця 4.12 — Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіль	кість частинс	ок (шт.)		Перецантноку
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)
0,5	800	347	453	56,6	5,0
1	800	303	497	62,1	13,9
1,5	800	228	572	71,5	25,7
2	800	213	587	73,3	40,8
2,5	800	194	606	75,7	57,7
5	800	126	674	84,3	185,0
7	800	85	715	89,3	328,2
10	800	48	752	94,0	628,7
15	800	22	778	97,2	1333,1



Рисунок 4.24 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі від швидкості витікання із 5 рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість







$$d_{
m citku} = 0,25 \,\,{
m MM}$$



а) початкове положення (t = 0,0001 с); *б*) крайнє положення (t = 0,0025 с)



Рисунок 4.27 – Розрахункова сітка (довжина 41 мм, висота 8 мм)

Таблиця 4.13 – Дані розрахунку 10 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с без пульсацій

Швидкість	Кіль	кість частино	ок (шт.)		Перецалтиску
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)
0,5	800	281	519	64,9	26,9
1	800	280	520	65,0	27,1
1,5	800	245	555	69,4	33,3
2	800	198	602	75,2	80,7
2,5	800	179	621	77,6	114,5
5	800	109	691	86,4	368,4
7	800	78	722	90,3	660,7
10	800	51	749	93,6	1243,6
15	800	32	768	96,0	2591,4

Досліджено робочий канал та робоча геометрія каналу сепараційного обладнання з пульсаційним коагулятором із 10 рядами сітки діаметром 0,25 мм (рис. 4.26).

Розрахункова сітка каналу побудована за допомогою трикутних сегментів площею $S = 7,5 \cdot 10^{-8}$ м² (рис. 4.27).

У табл. 4.13 та 4.14 наведені результати розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляторних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно.
На рис. 4.28 і 4.29 зображено графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання та газодинамічного опору від швидкості в каналі із 10 рядами коагуляційної сітки.

Таблиця 4.14 — Дані розрахунку 10 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіль	кість частинс	ок (шт.)			
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	Перепад тиску (Па)	
0,5	800	218	582	72,8	27,0	
1	800	134	666	83,3	27,4	
1,5	800	66	734	91,8	57,6	
2	800	61	739	92,4	85,2	
2,5	800	59	741	92,7	113,6	
5	800	68	732	91,5	357,6	
7	800	61	739	92,4	643,8	
10	800	46	754	94,3	1217,8	
15	800	25	775	96,8	2585,7	

Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...10,0 м/с: із 64,9 до 72,8 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с та із 93,6 до 94,3 % при початковій швидкості потоку 7 м/с.

На рис. Г.7 та Г.8 подано розподіл амплітуди швидкостей та статичного тиску в каналі з діапазоном початкових швидкостей 0,5...15,0 м/с.



Рисунок 4.28 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі від швидкості витікання із 10 рядами коагуляційної сітки.

Початкова швидкість у каналі u (м/с); $d_{\text{сітки}} = 0,25$ мм



Рисунок 4.29 – Графік залежності газодинамічного опору від швидкості в каналі із 10 рядами коагуляційної сітки.

Початкова швидкість у каналі u (м/с); $d_{\text{сітки}} = 0,25$ мм



Рисунок 4.30 – Положення сітки:

а) початкове положення (t = 0,0001 с); б) крайнє положення (t = 0,0025 с)



Рисунок 4.31 – Розрахункова сітка каналу (довжина 68 мм, висота 8 мм)

Досліджені робочий канал та робоча геометрія каналу сепараційного обладнання з пульсаційним коагулятором із 20 рядами сітки діаметром 0,25 мм (рис. 4.30).

Розрахункова сітка каналу побудована за допомогою трикутних сегментів площею $S = 7,5 \cdot 10^{-8}$ м² (рис. 4.31).

У табл. 4.15 і 4.16 наведені результати розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляторних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно.

На рис. 4.32 і 4.33 зображені графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання та газодинамічного опору в каналі із 20 рядами коагуляційної сітки від швидкості.

Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...5,0 м/с:

- iз 66,8 до 92,6 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с;

– із 88,1 до 91,8 % при початковій швидкості потоку 5 м/с.

Швидкість	Кіль	кість частино	ок (шт.)		Перецан тиску
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	$\eta_{\Sigma}(\%)$	(Па)
0,5	800	266	534	66,8	29,3
1	800	242	558	69,8	53,4
1,5	800	207	593	74,1	100,1
2	800	198	602	75,3	158,4
2,5	800	185	615	76,9	240,6
5	800	95	705	88,1	742,9
7	800	56	744	93,0	1318,9
10	800	30	770	96,3	2480,3
15	800	18	782	97,8	5169,2

Таблиця 4.15 – Дані розрахунку 20 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с без пульсацій

Таблиця 4.16 — Дані розрахунку 20 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіль	кість частино	ок (шт.)	Перецал тиск		
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	η_{Σ} (%)	(Па)	
0,5	800	59	741	92,6	29,4	
1	800	35	765	95,6	60,9	
1,5	800	20	780	97,5	100,0	
2	800	9	791	98,8	170,7	
2,5	800	16	784	98,0	240,6	
5	800	66	734	91,8	738,8	
7	800	65	735	91,9	1319,4	
10	800	39	761	95,1	2512,0	
15	800	12	788	98,5	5216,6	



Рисунок 4.32 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі від швидкості витікання із 20 рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість у каналі *u* (м/с); *d*_{сітки} = 0,25 мм





 $d_{\rm citku} = 0,25 \,\,{
m MM}$



a) початкове положення (t = 0,0001 с); *б*) крайнє положення (t = 0,0025 с)



Рисунок 4.35 – Розрахункова сітка каналу (довжина 98 мм, висота 8 мм)

Досліджені робочий канал та робоча геометрія каналу сепараційного обладнання з пульсаційним коагулятором із 30 рядами сітки діаметром 0,25 мм (рис. 4.34).

Розрахункова сітка каналу побудована за допомогою трикутних сегментів площею $S = 7.5 \cdot 10^{-8}$ м² (рис. 4.35).

У табл. 4.17 і 4.18 наведені результати розрахунків осадження дисперсних частинок у коагуляторних сітках без пульсацій та з пульсаціями відповідно.

На рис. 4.36 і 4.37 зображені графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання та газодинамічного опору в каналі із 30 рядами коагуляційної сітки від швидкості.

Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...10,0 м/с:

- із 70,3 до 95,2 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с;
- із 96,9 до 97,7 % при початковій швидкості потоку 10 м/с.

Швидкість	Кіль	кість частино	ок (шт.)		Перепал тиску
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	$\eta_{\Sigma}(\%)$	(Па)
0,5	800	238	562	70,3	38,9
1	800	211	589	73,6	80,0
1,5	800	197	603	75,4	155,7
2	800	184	616	77,0	246,0
2,5	800	162	638	79,8	350,9
5	800	75	725	90,6	1094,6
7	800	51	749	93,6	1952,7
10	800	25	775	96,9	3678,3
15	800	13	787	98,4	7723,4

Таблиця 4.17 – Дані розрахунку 30 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с без пульсацій

Таблиця 4.18 — Дані розрахунку 30 рядів сіток діаметром 0,25 мм у діапазоні початкових швидкостей 0,5...20,0 м/с, механічна пульсація коагулятора з v = 100 Hz, A = 0,2 мм

Швидкість	Кіль	кість частино	ок (шт.)		Перецал тиску
на вході <i>и</i> (м/с)	на вході	на виході	уловлених	$\eta_{\Sigma}(\%)$	(Па)
0,5	800	38	762	95,2	40,6
1	800	47	753	94,1	82,1
1,5	800	14	786	98,2	150,4
2	800	18	782	97,8	245,1
2,5	800	29	771	96,4	360,9
5	800	17	783	97,9	1093,0
7	800	31	769	96,1	1960,1
10	800	18	782	97,7	3686,1
15	800	6	794	99,3	7734,3



Рисунок 4.36 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі від швидкості витікання із 30 рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість у каналі *u* (м/с); *d*_{сітки} = 0,25 мм



Рисунок 4.37 – Графік залежності газодинамічного опору від швидкості в каналі із 30 рядами коагуляційної сітки. Початкова швидкість у каналі *u* (м/с);

$$d_{\rm citku} = 0,25 \,\,{
m MM}$$

4.3 Дослідження сепараційних характеристик акустиконеізотермічної градієнтної технології в багатофункціональних поверхнях каналів

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.

Ультразвукова коагуляція являє собою процес зближення й збільшення зважених у газі або рідині дрібних твердих частинок, рідких крапель і газових пузирчиків під дією акустичних коливань ультразвукових частот.

Розрізняють дві стадії коагуляції. Спочатку частинки беруть участь у коливальному русі та рухаються за напрямом руху газу між пучностями й вузлами коливань. При цьому вони в результаті зіткнень і під дією сил взаємного тяжіння злипаються та збільшуються в розмірах.

На другій стадії збільшені частинки вже не рухаються за звуковими коливаннями, а роблять хаотичні рухи. Причому в результаті нових взаємних зіткнень та зіткнень з меншими частинками їх розміри продовжують збільшуватися.

В аерозолях дрібні частинки зазнають впливу гравітаційного поля, беруть участь у броунівському русі, захоплюються конвективними та гідродинамічними потоками. При накладенні ультразвукового поля виникають додаткові сили, що сприяють коагуляції: зважена в газі або рідині частинка втягується в коливальний рух, на неї діє тиск звукового випромінювання, викликаючи її дрейф, і вона захоплюється акустичними потоками.

Ефективність процесу очищення промислових газів від дисперсних домішок за допомогою накладення ультразвукових коливань високої інтенсивності визначається:

- інтенсивністю коливань;
- часом експозиції;
- частотою;
- вихідною концентрацією.

Осадження частинок різних розмірів відбувається при різній частоті коливань: чим менші частинки, тем вища необхідна частота. На практиці зазвичай використовують звук із частотами 0,5...20,0 кГц; при цьому осаджуються частинки розміром 0,5...5,0 мкм.

Досліджені робочий канал та робоча геометрія сепараційного обладнання з ультразвуковими хвилями із 5 рядами діаметром 0,5 мм.

Розрахункова сітка каналу побудована за допомогою трикутних сегментів площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (рис. 4.38) [130].



Джерело ультразвукових коливань

Рисунок 4.38 – Розрахункова сітка каналу (довжина 21 мм, висота 8,5 мм)

Досліджувався канал з п'ятьма рядами коагуляційної сітки, діапазоном початкової швидкості потоку в каналі 5...20 м/с і частотою ультразвукових коливань 10 кГц. Виконані дослідження впливу діаметра частинок аерозольних середовищ на ефективність ультразвукової сепарації.

У табл. 4.19 та 4.20 наведені результати розрахунків осадження дисперсних частинок різного діаметра в коагуляційних сітках без ультразвукових хвиль та з ультразвуковими хвилями відповідно. За даними таблиць побудовані графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі із 5 рядами коагуляційної сітки від діаметра частинок (рис. 4.39). Ультразвук малоефективний стосовно високодисперсних аерозолів та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання (із 48,07 до 67,95 %) при діаметрі частинок 5 мкм [130].



Рисунок 4.39 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлення від діаметра частинок у каналі із 5 рядами коагуляційної сітки при початковій швидкості 5 м/с; $d_{сітки} = 0,5$ мм

Таблиця 4.19 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 5 м/с без ультразвуку (початкова швидкість $U_0 = 5$ м/с; частота ультразвукових хвиль v = 0 кГц)

Пізметр	Загальна	Кількість	Значення
діамстр цастинок мим	кількість	уловлених	коефіцієнта
	частинок	частинок	уловлювання, %
1	880	183	20,79
3	880	412	46,82
5	880	423	48,07
10	880	759	86,25
20	880	805	91,48
30	880	814	92,50

Таблиця 4.20 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 5 м/с, ультразвукові хвилі із частотою v = 10000 Hz (початкова швидкість $U_0 = 5$ м/с; частота ультразвукових хвиль v = 10 кГц)

Пізметр	Загальна	Кількість	Значення
діаметр	кількість	уловлених	коефіцієнта
Yac INHOK, MKM	частинок	частинок	уловлювання, %
1	880	216	24,55
3	880	442	50,23
5	880	598	67,95
10	880	744	84,50
20	880	843	95,79
30	880	865	98,29

Розподіл амплітуди швидкостей та статичного тиску в каналі з початковою швидкістю 5 м/с наведений на рис. 4.40.



a)



Рисунок 4.40 – Розподіл амплітуди швидкостей (*a*) та статичного тиску (б) у каналі з початковою швидкістю 5 м/с

У табл. 4.21 і 4.22 наведені результати розрахунків осадження дисперсних частинок різного діаметра в коагуляційних сітках без ультразвукових хвиль та з ультразвуковими хвилями відповідно. За даними таблиць побудовані графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від діаметра частинок у каналі із 5 рядами коагуляційної сітки (рис. 4.41) [130].



Рисунок 4.41 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від діаметра частинок у каналі із 5 рядами коагуляційної сітки при початковій швидкості 10 м/с; d_{сітки} = 0,5 мм

Таблиця 4.21 — Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 10 м/с без ультразвуку (початкова швидкість $U_0 = 10$ м/с; частота ультразвукових хвиль v = 0 кГц)

Діаметр частинок, мкм	Загальна кількість частинок	Кількість уловлених частинок	Значення коефіцієнта уловлювання, %
1	880	176	20,00
3	880	596	67,73
5	880	606	68,86
10	880	792	90,00
20	880	814	92,50
30	880	814	92,50

Таблиця 4.22 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 5 м/с, ультразвукові хвилі із частотою $\nu = 10000$ Hz (початкова швидкість $U_0 = 10$ м/с; частота ультразвукових хвиль $\nu = 10$ кГц)

Пізметр	Загальна	Кількість	Значення
даметр	кількість	уловлених	коефіцієнта
Yacinhok, MKM	частинок	частинок	уловлювання, %
1	880	197	22,39
3	880	648	73,64
5	880	734	83,41
10	880	819	93,07
20	880	867	98,52
30	880	875	99,43

У табл. 4.23 і 4.24 подані результати розрахунків осадження дисперсних частинок різного діаметра в коагуляційних сітках без ультразвукових хвиль та з ультразвуковими хвилями відповідно. За даними таблиць побудовані графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від діаметра частинок у каналі із 5 рядами коагуляційної сітки (рис. 4.42).



Рисунок 4.42 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від діаметра частинок у каналі із 5 рядами коагуляційної сітки при початковій швидкості 15 м/с; $d_{сітки} = 0,5$ мм

Таблиця 4.23 — Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 15 м/с без ультразвуку (початкова швидкість $U_0 = 15$ м/с; частота ультразвукових хвиль v = 0 кГц)

	Загальна	Кількість	Значення
діаметр частинок,	кількість	уловлених	коефіцієнта
IVI KIVI	частинок	частинок	уловлювання, %
1	880	231	26,25
3	880	667	75,79
5	880	708	80,45
10	880	803	91,25
20	880	814	92,50
30	880	814	92,50

Таблиця 4.24 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 15 м/с, ультразвукові хвилі із частотою v = 10000 Hz (початкова швидкість $U_0 = 15$ м/с; частота ультразвукових хвиль v = 10 кГц)

Пізметр цастицок	Загальна	Кількість	Значення
діаметр частинок,	кількість	уловлених	коефіцієнта
	частинок	частинок	уловлювання, %
1	880	244	27,73
3	880	694	78,86
5	880	761	86,48
10	880	833	94,66
20	880	868	98,64
30	880	876	99,54

У табл. 4.25 і 4.26 наведені результати розрахунків осадження дисперсних частинок різного діаметра в коагуляційних сітках без ультразвукових хвиль та

з ультразвуковими хвилями відповідно. За даними таблиць побудовані графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від діаметра частинок у каналі із 5 рядами коагуляційної сітки діаметром 0,5 мм (рис. 4.43).



Рисунок 4.43 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання від діаметра частинок у каналі із 5 рядами коагуляційної сітки при початковій швидкості 20 м/с; $d_{\text{сітки}} = 0,5$ мм

Таблиця 4.25 — Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 20 м/с без ультразвуку (початкова швидкість $U_0 = 20$ м/с; частота ультразвукових хвиль v = 0 кГц)

	Загальна	Кількість	Значення
діаметр частинок,	кількість	уловлених	коефіцієнта
	частинок	частинок	уловлювання, %
1	880	274	31,14
3	880	708	80,45
5	880	730	82,95
10	880	803	91,25
20	880	814	92,50
30	880	814	92,50

Таблиця 4.26 – Дані розрахунку 5 рядів сіток діаметром 0,5 мм при початковій швидкості 20 м/с, ультразвукові хвилі із частотою v = 10000 Hz (початкова швидкість $U_0 = 20$ м/с; частота ультразвукових хвиль v = 10 кГц)

	Загальна	Кількість	Значення
діаметр частинок, мкм	кількість	уловлених	коефіцієнта
	частинок	частинок	уловлювання, %
1	880	255	28,98
3	880	702	79,77
5	880	764	86,82
10	880	836	95,00
20	880	873	99,20
30	880	874	99,32

Акустичні коливання низькочастотного діапазону враховувалися шляхом моделювання вібрації стінок (джерела ультразвуку) з відповідною частотою. Гармонійний закон зміни поступальної швидкості по осі *у* описується рівнянням

$$u_{y} = 2 \cdot A \cdot \pi \cdot \vartheta \cos(2\pi \cdot \vartheta)$$

де A = 0,00002 мм – амплітуда; $\vartheta = 10000$ Гц – частота коливань.

Проведені теоретичні розрахунки дозволили встановити, що при частоті ультразвукових коливань 10 кГц оптимальні розміри уловлюваних частинок аерозолів лежать у діапазоні до 5 мкм. Зі збільшенням дисперсності аерозолів застосування ультразвукових хвиль у сепараційному очиснику є недоцільним. На рис. 4.44 подано графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання

в каналі витікання з п'ятьма рядами коагуляційної сітки від діаметра частинок за наявності ультразвукової інтенсифікації.

У табл. 4.27–4.30 наведені дані результатів розрахунку осадження дисперсних частинок різного діаметра в коагуляційних сітках без ультразвукових хвиль та з ними при початкових швидкостях потоку 5 і 10 м/с відповідно.



Рисунок 4.44 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі витікання з п'ятьма рядами коагуляційної сітки від діаметра частинок за наявності ультразвукової інтенсифікації:

 \Diamond – неізотермічна постановка; \Box – ізотермічна постановка; $d_{\text{сітки}} = 0,5$ мм

Таблиця 4.27 — Розрахунок сіток (діаметр 0,5 мм, 5 рядів, ультразвукові хвилі v = 10 кГц, початкова швидкість $U_0 = 5$ м/с)

Діам частинс	іетр Эк, мкм	Загальна кількість частинок	Кількість уловлених частинок	Значення коефіцієнта уловлювання пульсацій, %
Nº 1	1	880	217	24,66
Nº 2	1	880	210	23,86
Nº 3	1	880	221	25,11
<u>№</u> 4	1	880	216	24,54
Осеред.	1	880	216	24,55
Nº 1	3	880	439	49,89
Nº 2	3	880	445	50,57
Nº 3	3	880	443	50,34
<u>N</u> º 4	3	880	441	50,11
Осеред.	3	880	442	50,23
Nº 1	5	880	598	67,95
Nº 2	5	880	605	68,75
Nº 3	5	880	589	66,93
№ 4	5	880	600	68,18
Осеред.	5	880	598	67,95
Nº 1	10	880	739	83,98
Nº 2	10	880	744	84,54
№ 3	10	880	749	85,11
№ 4	10	880	744	84,54
Осеред.	10	880	744	84,54
Nº 1	20	880	841	95,57
Nº 2	20	880	842	95,68
Nº 3	20	880	847	96,25
<u>N</u> º 4	20	880	842	95,68
Осеред.	20	880	843	95,79
Nº 1	30	880	861	97,84
Nº 2	30	880	864	98,18
№ 3	30	880	866	98,41
<u>N</u> ⁰ 4	30	880	869	98,75
Осеред.	30	880	865	98,29

Таблиця 4.28 — Ультразвукові хвилі із частотою $\vartheta = 10000$ Hz у неізотермічній постановці (максимальний температурний градієнт 80 °C), початкова швидкість $U_0 = 5$ м/с, частота ультразвукових хвиль v = 10 кГц

Діам частинс	етр ок, мкм	Загальна кількість частинок	Кількість уловлених частинок	Значення коефіцієнта уловлювання пульсацій, %
Nº 1	1	880	226	25,68
Nº 2	1	880	206	23,40
<u>№</u> 3	1	880	203	23,07
<u>N</u> º 4	1	880	204	23,18
Осеред.	1	880	210	23,83
Nº 1	3	880	744	84,55
Nº 2	3	880	745	84,66
<u>№</u> 3	3	880	743	84,43
<u>№</u> 4	3	880	746	84,77
Осеред.	3	880	745	84,60
Nº 1	5	880	770	87,50
<u>№</u> 2	5	880	773	87,84
<u>№</u> 3	5	880	769	87,39
<u>№</u> 4	5	880	771	87,61
Осеред.	5	880	771	87,59
Nº 1	10	880	833	94,66
Nº 2	10	880	833	94,66
<u>№</u> 3	10	880	833	94,66
<u>№</u> 4	10	880	833	94,66
Осеред.	10	880	833	94,66
Nº 1	20	880	869	98,75
Nº 2	20	880	870	98,86
<u>№</u> 3	20	880	869	98,75
<u>№</u> 4	20	880	871	98,98
Осеред.	20	880	870	98,84
Nº 1	30	880	874	99,32
Nº 2	30	880	876	99,55
<u>№</u> 3	30	880	875	99,43
<u>№</u> 4	30	880	877	99,66
Осеред.	30	880	876	99,49

Таблиця 4.29 — Розрахунок сіток (діаметр 0,5 мм, 5 рядів, ультразвукові хвилі $\nu = 10$ кГц, початкова швидкість $U_0 = 10$ м/с)

Діам частинс	іетр Эк, мкм	Загальна кількість частинок	Кількість уловлених частинок	Значення коефіцієнта уловлювання пульсацій, %
Nº 1	1	880	198	22,50
Nº 2	1	880	195	22,16
<u>№</u> 3	1	880	197	22,39
<u>№</u> 4	1	880	198	22,50
Осеред.	1	880	197	22,39
Nº 1	3	880	649	73,75
Nº 2	3	880	651	73,98
<u>№</u> 3	3	880	645	73,29
<u>№</u> 4	3	880	647	73,52
Осеред.	3	880	648	73,64
Nº 1	5	880	734	83,41
Nº 2	5	880	735	83,52
<u>№</u> 3	5	880	736	83,64
<u>№</u> 4	5	880	734	83,41
Осеред.	5	880	734	83,41
Nº 1	10	880	821	93,29
Nº 2	10	880	820	93,18
Nº 3	10	880	818	92,95
<u>№</u> 4	10	880	817	92,84
Осеред.	10	880	819	93,07
Nº 1	20	880	864	98,18
Nº 2	20	880	867	98,52
<u>№</u> 3	20	880	865	98,29
<u>№</u> 4	20	880	872	99,09
Осеред.	20	880	867	98,52
Nº 1	30	880	874	99,32
Nº 2	30	880	876	99,54
Nº 3	30	880	878	99,77
<u>№</u> 4	30	880	872	99,09
Осеред.	30	880	875	99,43

Таблиця 4.30 – Ультразвукові хвилі із частотою $\vartheta = 10000$ Hz у неізотермічній постановці (максимальний температурний градієнт 80 °C), початкова швидкість $U_0 = 10$ м/с, частота ультразвукових хвиль v = 10 кГц

Діам частинс	етр ок, мкм	Загальна кількість частинок	Кількість уловлених частинок	Значення коефіцієнта уловлювання пульсацій, %
Nº 1	1	880	191	21.70
Nº 2	1	880	193	21,93
Nº 3	1	880	190	21,59
Nº 4	1	880	192	21,82
Осеред.	1	880	192	21,76
Nº 1	3	880	670	76,14
Nº 2	3	880	672	76,36
Nº 3	3	880	671	76,25
Nº 4	3	880	671	76,25
Осеред.	3	880	671	76,25
Nº 1	5	880	692	78,64
Nº 2	5	880	695	78,98
Nº 3	5	880	693	78,75
Nº 4	5	880	694	78,86
Осеред.	5	880	694	78,81
Nº 1	10	880	737	83,75
Nº 2	10	880	740	84,09
Nº 3	10	880	735	83,52
<u>№</u> 4	10	880	739	83,98
Осеред.	10	880	738	83,84
Nº 1	20	880	781	88,75
Nº 2	20	880	785	89,20
<u>№</u> 3	20	880	778	88,41
<u>№</u> 4	20	880	780	88,64
Осеред.	20	880	781	88,75
Nº 1	30	880	790	89,77
Nº 2	30	880	792	90,00
Nº 3	30	880	791	89,89
<u>N</u> ⁰ 4	30	880	790	89,77
Осеред.	30	880	791	89,86

На рис. 4.45 зображений графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі витікання з п'ятьма рядами коагуляційної сітки від діаметра частинок.



Рисунок 4.45 – Графік залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі витікання з п'ятьма рядами коагуляційної сітки від діаметра частинок: ◊ – неізотермічна постановка; □ – ізотермічна постановка; d_{сітки} – 0,5 мм

За даними таблиць побудовані графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлювання в каналі витікання з п'ятьма рядами коагуляційної сітки від діаметра частинок при початковій швидкості потоку 5 і 10 м/с. Для порівняння наведений графік аналогічної залежності для каналу з ізотермічною течією. Аналізуючи обидва графіка, доходимо висновку, що при швидкості 5 м/с неізотермічний градієнтний ефект збільшує коефіцієнт осадження практично у всьому діапазоні діаметрів частинок. Найбільш сильний вплив неізотермічного градієнтного ефекту спостерігається на ділянці 3...5 мкм. При діаметрі частинок 3 мкм значення сумарного коефіцієнта уловлювання збільшується із 50,23 до 84,60 %. На діапазонах 1...3 і 5...30 мкм вплив неізотермічного градієнтного ефекту помітно слабшає.

Зі збільшенням початкової швидкості газового потоку від 10 м/с і вище тривалість перебування частинок у звуковому полі зменшується і вплив неізотермічного градієнтного ефекту стає незначним та порівнянним з базовою похибкою моделювання. Застосовано розроблену теплофізичну модель для розрахунку дисперсних газових потоків в неізотермічних умовах, яка дозволяє розв'язувати нестаціонарні задачі за часом: крок за часом $\Delta t = 0,00005$ с; початкове значення часу $t_0 = 0,00001$ с; кінцеве значення часу $t_1 = 30$ с. Досліджено вплив неізотермічного градієнтного ефекту на концентрацію дисперсної фази при проходженні коагулятора 3 ультразвуковою інтенсифікацією осадження.

Розрахунковим способом підтверджені експериментальні дані про позитивний вплив неізотермічного градієнтного ефекту на уловлювання високодисперсних частинок в ультразвукових сіткових коагуляторах. При діаметрі частинок 3 мкм значення сумарного коефіцієнта уловлювання збільшується із 50,23 до 84,60 % при початковій швидкості потоку 5 м/с. При швидкостях руху середовища від 10 м/с і вище вплив неізотермічного градієнтного ефекту на осадження проявляється незначно та ним можна знехтувати.

Основні результати і висновки по розділу 4

1. Здійснено дослідження сепараційних неізотермічих градієнтних технологій багатофункціональних поверхонь за допомогою голографічної інтерферометрії в реальному часі. Установлено, що температура шарів повітря над елементами сітки практично дорівнює температурі поверхні осадження (температура стінки $T_c = 20$ °C), а максимальна температура майже відповідає температурі потоку ($T_0 = 100$ °C). По мірі віддалення від сітки відбувається швидке вирівнювання температур унаслідок змішування шарів з холодним повітрям зовнішнього середовища, температура усереднюється і встановлюється на рівні 50 °C.

2. Виконано дослідження гідрофізичних характеристик неізотермічних градієнтних технологій у багатофункціональних поверхнях каналів. Установлено, що для інтенсифікації неізотермічного градієнтного перенесення частинок перспективно використовувати багатошарові коагулятори, сітки істотно впливають на охолодження потоку та є поверхнями, на яких слід очікувати інтенсивне осадження за рахунок сил неізотермічної градієнтної технології разом зі стінками каналу. Біля стінки температура спадає на 25...30 °C, а після 10-го ряду сітки вона знизилася на 15 °C, що свідчить про доцільність подальшого розвитку поверхні охолодження за рахунок збільшення кількості рядів охолоджуваних сіток.

3. Виконано дослідження впливу неізотермічності на гідродинамічні характеристики потоку в сітковому коагуляторі. Розрахунки показали, що розподіл основних гідродинамічних характеристик потоку (швидкості, інтенсивності турбулентності, кінетичної енергії турбулентності, статичного тиску) практично однаковий для інтервалу перепаду температур 0...80 °C і швидкості потоку 0,5...7,0 м/с.

4. Дослідження показали, що при проходженні дисперсним двофазним потоком сіток гофрованого коагулятора відбувається рівномірний розподіл потоку по всій його площі. У такому коагуляторі можна добитися більшого

зниження температури – зі 100 до 30...40 °С, що дозволяє очікувати високі результати з неізотермічного градієнтного осадження частинок та дає можливість значного зниження вхідної швидкості у міру руху газу до вихідного перерізу: наприклад, із 15 до 3 м/с для відвертання вторинного віднесення крапель потоком.

5. 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 дифузіофорезу 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 %.

6. Здійснено дослідження сепараційних характеристик акустикофоретичної технології в багатофункціональних поверхнях каналів (пульсація коагуляційних сіток). Установлено, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання в діапазоні швидкостей 0,5...10,0 м/с: із 70,3 до 95,2 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с; із 96,9 до 97,7 % при початковій швидкості потоку 10 м/с.

7. Здійснено дослідження сепараційних характеристик акустикофоретичної технології в багатофункціональних поверхнях каналів (пульсація стінок каналу). Досліджено осадження частинок різних розмірів, яке відбувається при різній частоті коливань: чим менші частинки, тем вища необхідна частота. У дослідженні використано звук із частотами 0,5...20,0 кГц; при цьому осаджуються частинки розміром 0,5...5,0 мкм.

8. Проведені теоретичні розрахунки дозволили встановити, що при частоті ультразвукових коливань 10 кГц оптимальні розміри уловлюваних частинок аерозолів лежать у діапазоні до 5 мкм. Зі збільшенням дисперсності аерозолів застосування ультразвукових хвиль у сепараційному очиснику є недоцільним.

246

9. Установлено, що ультразвук малоефективний стосовно високодисперсних аерозолів та збільшує значення сумарного коефіцієнта уловлювання із 48,07 до 67,95 % при діаметрі частинок 5 мкм.

10. Проведені теоретичні розрахунки дозволили встановити, що при частоті ультразвукових коливань 10 кГц оптимальні розміри уловлюваних частинок аерозолів лежать у діапазоні до 5 мкм. Зі збільшенням дисперсності аерозолів застосування ультразвукових хвиль у сепараційному очиснику є недоцільним.

11. вплив неізотермічного градієнтного Досліджено ефекту на концентрацію дисперсної фази при проходженні коагулятора з ультразвуковою інтенсифікацією осадження. Установлено, що при швидкості м/с 5 неізотермічний градієнтний ефект збільшує коефіцієнт осадження практично у всьому діапазоні діаметрів частинок. При діаметрі частинок 3 мкм значення сумарного коефіцієнта уловлювання збільшується із 50,23 до 84,60 %. При швидкостях руху середовища від 10 м/с і вище вплив неізотермічних градієнтних ефектів на осадження проявляється несуттєво.

РОЗДІЛ 5

З**D**-МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СЕПАРАТОРІВ НА ОСНОВІ БАГАТОРІВНЕВИХ ГРАДІЄНТНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ. УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

5.1 Конструктивні схеми та рекомендації з побудови пристроїв очищення дисперсних середовищ для екологічних та енергетичних установок

На основі створеної технологічної послідовності розроблено базове екологічне й ресурсозберігаюче обладнання, що охоплює широкий інтервал витрат газу, вимог до ступеня очищення й робочих станів дисперсного двофазного газового середовища.

Запропонована модель багаторівневої системи очищення для розробки рекомендацій та побудови пристроїв сепарації дисперсних середовищ для екологічних і економічних енергетичних установок:

- рівень № 1 (INS) – технології інерційної сепарації;

– рівень № 2 (GTUS) – технології градієнтної турбофоретичної сепарації;

– рівень № 3 (GTFS) – технології градієнтної неізотермічної сепарації;

– рівень № 4 (GAFS) – технології градієнтної акустикофоретичної сепарації.

На основі багаторівневого підходу було враховано випадки осадження частинок:

- у каналі при обтіканні потоком різноманітних викривлених поверхонь;

– при обтіканні поверхонь струменем під різними кутами атаки;

- при обтіканні викривлених чи плоских поверхонь системами струменів;

у каналах при обтіканні багатофункціональних поверхонь із систем тонких циліндрів;

 у каналах при обтіканні тонких пластин з виступами на рівні примежових шарів;

- у каналах при обтіканні поверхонь у відривних зонах;

у багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляційних гофрованих сітках);

- у відривних зонах у примежових шарах;

 на поверхнях каналів та поверхнях осадження за рахунок турбулентної дифузії;

 на поверхнях каналів за наявності перепаду температур між стінками каналу й аерозольним середовищем;

 на поверхнях каналів за наявності перепаду температур між аерозольним середовищем та стінками;

 на охолоджуваних багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляторах з гофрованих сіток);

- у вхідних і вихідних ступенях інерційного осадження;

- у каналах з багатофункціональними поверхнями осадження;

- у каналах з однохвильовими поверхнями осадження.

Комбінація різних технологічних рівнів сепарації дозволить побудувати високоефективне сепараційне обладнання енергетичних установок.

5.1.1 Конструктивна схема та рекомендація з побудови сепараторів для пневмосистем і картерних газів двигунів внутрішнього згоряння

Розроблені схема та рекомендація щодо очищення стиснутого газу для енергетичних установок складаються з наступних частин:

- рівень № 1 (INS) - технології інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) - технології градієнтної турбофоретичної сепарації.

Сфера застосування цих засобів та їх ефективність для промислового очищення газів визначаються характеристиками очисних пристроїв, що реалізують зазначені способи.

Для очисників стиснутого повітря низького і середнього тисків та сепараторів картерних газів двигунів внутрішнього згоряння рекомендовано використання багаторівневих технологій сепарації. Запропоновані конструкції охоплюють інтервал витрат стиснутого повітря 1...800 м³/год і забезпечують очистку за 3-м класом чистоти (повністю уловлюють частинки більше 5 мкм) для діапазону тисків 0,1...6,0 Мпа. Розроблено універсальний струминний модуль (рис. 5.1). Масловологовіддільники за модульним принципом, тобто на наборі типових модулів на витрати стиснутого повітря 5...800 м³/год, забезпечують очищення третього класу.

Модулі відрізняються лише прохідним перерізом сопел і коагулятора, який може розташовуватися на роздавальнику газу з різних боків. Для того щоб уникнути винесення крупних крапель у верхню частину корпусу, передбачене установлення козирка півциліндричної П-подібної форми. Прохідний переріз оболонки збільшується в напрямку руху; це забезпечує гравітаційне осадження частинок, що виносяться з коагулятора в нижній частині корпусу та виводяться з корпусу через конденсатовідвідник. Діаметр пластин у струминному модулі складає $10d_0$.

Вони можуть розташовуватися на роздільнику газу з різних боків. Крім цього, для запобігання винесенню крупних краплей у верхню частину корпусу передбачене установлення козирка у вигляді півциліндричної П-подібної форми. Прохідний переріз оболонки збільшується за направленням тиску; це забезпечує гравітаційне осадження крапель, що виносяться з коагулятора, в нижній частині корпусу. Кількість рядів гофрованої сітки в коагуляторі обирається залежно від заданого ступеня очищення і допустимого опору. Наприклад, нормальна робота пневмоінструменту та пневмофарборозпилювача, які на даний момент застосовуються, забезпечується за наявності в повітрі частинок менше 5 мкм (5-й клас забрудненості). Такий ступінь очищення забезпечує струминний модуль з коагулятором, що має шість рядів гофрованої сітки № 0,1 або 0,25. Такий коагулятор є основним для типового ряду струминних модулів, що стиснутого повітря суднобудівних використовуються системах i В машинобудівних заводів. Для автоматизованого відведення уловленого масловологовіддільники конденсату забезпечені пористим конденсатовідвідником.

Струминні масловологовіддільники складаються з корпусу, патрубка підведення повітря, зануреного в корпус, конденсатовідвідника, струминних модулів з козирками, патрубка відведення повітря. Стиснуте повітря через патрубок потрапляє в струминний модуль, де очищується від краплей і направляється у внутрішній об'єм корпусу. Рух газу на виході з модуля має вихідний характер, що сприяє осадженню краплей у нижній частині корпусу. Потім повітря змінює свій напрямок і рухається вгору, причому середня швидкість його руху не перевищує 2 м/с. Уловлена рідина через пористий конденсатовідвідник потрапляє за межі корпусу без втрат стиснутого повітря [146].

251



 $6-\Pi$ -подібна оболонка; D-діаметр модуля (D=80 та 140 мм); d_0- вхідне сопло
5.1.2 Конструктивна схема та рекомендація з побудови неізотермічного сепаратора для енергетичних установок

Конструктивна схема та рекомендація з побудови односекційних неізотермічних сепараторів для енергетичних установок включають у себе:

- рівень № 1 (INS) технології інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технології градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технології градієнтної неізотермічної сепарації.

Базовий газоочисник з односекційним неізотермічним сітковим кільцевим коагулятором базується на методах інтенсифікації перенесення в неізотермічних потоках і відрізняється тим, що попередній рівень грубого очищення має охолоджувану пластину та екран (рис. 5.2, *a*) [139].

У ньому розширено діапазон уловлювання високодисперсних частинок. Нові якості отримані за рахунок охолодження пластини і сіткового коагулятора. Різка зміна температури в пристінних шарах зумовила прояв неізотермічних градієнтних ефектів, створила умови для конденсації парів. Масовий потік пари до охолоджуваної поверхні захоплює в рух мікрочастинки, тобто сприяє очищенню газу від низькоінерційних частинок. У таких конструкціях можна забезпечити повне уловлювання крапель діаметром більше 2 мкм і конденсувати пари речовин. Струминний модуль очищення являє собою охолоджувану теплоносієм систему «сопло-пластина» та механічний сітковий кільцевий коагулятор. Він складається з корпусу 7 із патрубками підведення газу, що переходить у сопло 2 та патрубок зливу рідини. Навпроти сопла 2 установлена плоска охолоджувана пластина-диск 3. Сопло має охолоджуваний екран, між екраном і пластиною З розташований кільцевий сітковий коагулятор 5, виконаний з дрібнопористих сіток у вигляді спіральних гофрованих смуг з протилежним нахилом гофрів у сусідніх смугах. Для охолодження пластини та екрана із зовнішнього боку прикріплені теплообмінники 4 або в тілі пластини й екрана виконуються спеціальні канавки для теплоносія [139].







Рисунок 5.2 – Базове неізотермічне обладнання з очищення дисперсних двофазних середовищ для екологічних і ресурсозберігаючих технологій:

а) плоский сепаратор – вигляд зверху; б) плоский сепаратор – вигляд збоку; 1 – вхідний патрубок; 2 – сопло; 3 – пластина; 4 – теплообмінник; 5 – сітковий коагулятор; 6 – патрубок зливу; 7 – корпус; 8 – вихідний патрубок; 9 – пакет профілів Внутрішній простір корпусу утворює відсік для гравітаційного осадження винесених з коагулятора крупних крапель.

Робота такого газоочисника полягає в наступному. Дисперсне двофазне середовище, що очищується, поступає в систему «сопло–пластина», де потік розганяється і відбувається осадження крупних частинок (більше 5 мкм) за рахунок сил інерції.

Далі потік із дрібними частинками надходить у сітковий неізотермічний кільцевий коагулятор 5, де відбуваються уловлювання частинок за рахунок неізотермічного градієнтного ефекту, дифузіофорезу, турбофорезу, турбулентної дифузії та інерції, а також конденсація пари речовин. Осаджені на дротах сітки частинки утворюють плівку рідини, яка стягується за допомогою капілярних сил у кути комірок сітки, тим самим утворюючи крупні об'єми рідини. По мірі збільшення об'єму рідини в кутках елементів каналу відбувається зрив у вигляді крупних крапель і винесення їх потоком в об'єм за коагулятором. Винесені краплі осідають за рахунок сил тяжіння в нижній частині корпусу, звідки видаляються за допомогою патрубка зливу.

Очищений від крапель потік направляється до вихідного патрубка.

Газоочисник з неізотермічним кільцевим коагулятором доцільно використовувати для очищення гарячих газів при тиску до 10 МПа з концентрацією крапель до 100 г/м³. Раціональні об'ємні витрати через нього 1,0...200,0 м³/год.

Базовий газоочисник з неізотермічними плоскими сітковими коагуляторами і рівнем скидання розроблений для підвищених витрат двофазного середовища з концентрацією рідкої фази до 5000 г/м³ (див. рис. 5.2). Раціональні об'ємні витрати для нього знаходяться в межах 100...1200 м³/год.

Базовий газоочисник з неізотермічними кільцевими сітковими коагуляторами і рівнем скидання розроблений для підвищених витрат двофазного середовища з концентрацією рідкої фази до 5000 г/м³ (рис. 5.3). Раціональні об'ємні витрати для нього знаходяться в межах 40...140 м³/год.



Рисунок 5.3 – Схема сепаратора аерозолів з проміжним підігріванням і кільцевими сітковими коагуляторами:

1 – вхідний патрубок; 2 – вхідний патрубок для неізотермічної інжекції; 3 – зливний патрубок; 4 – вхідний патрубок; 5 – корпус сепаратора; 6 – теплообмінник; 7 – неізотермічний коагулятор; 8 – вихідний патрубок системи охолодження; 9 – вхідний патрубок системи охолодження; 10 – сепараційний профіль; 11 – інжектор

5.1.3 Конструктивна схема та рекомендація з побудови багатоступінчатих плоских акустикофоретичних сепараторів для газотурбінних двигунів

На основі розроблених сепараційних градієнтних аерозольних технологій створена посекційна конструктивна схема масловіддільника для систем суфлювання ГТД, що охоплює широкий інтервал геометрій прохідних перерізів ступенів очищення, їх конструктивних виконань, а також вимог до ступеня очищення (рис. 5.4) [143]:

- рівень № 1 (INS) - технології інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) - технології градієнтної турбофоретичної сепарації;

– рівень № 4 (GAFS) – технології градієнтної акустикофоретичної сепарації.



Рисунок 5.4 – Конструктивна схема масловіддільника на основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій:

h – висота газоочисника; L – довжина масловіддільника; 1 – вхідний патрубок із системою інерційних сопел; 2 – система вхідних сопел у коагулятор; 3 – перший ступінь: коагулятор з набором гофрованих сіток від 0,1...0,5 мм; 4 – другий ступінь: коагулятор з набором гофрованих сіток від 0,05...0,20 мм; 5 – пакет оптимізованих акустикофоретичних профілів

осадження; 6 – система вихідних сопел; 7 – вихідний патрубок із системою інерційних сопел

У першому скидному ступені відбувається інтенсифікація осадження високо- і низькоінерційних крапель при обтіканні поверхонь початковою ділянкою струменя (струменів) за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу, дифузіофорезу та у відривних зонах. Тут також проходить стадія формування плівки рідини, що утворюється з уловлених крапель на поверхні осадження з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння.

У другому ступені тонкого очищення відбувається інтенсифікація осадження низькоінерційних частинок в акустикофоретичних коагуляторах за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу і коагуляції частинок за рахунок акустичного впливу (генератора акустичних коливань). У ньому також є стадія винесення скоагульованих крапель з механічних коагуляторів потоком з їх організованим осадженням на поверхні сепаруючих профілів за рахунок сил тяжіння та інерції.

На третьому – вихідному – ступені очищення відбувається інтенсифікація видалення уловленої рідини і відведення очищеного газу з корпусу газоочисника. Запропонована конструкція масловіддільника працює наступним чином. Очищуване середовище через вхідний патрубок надходить у роздавальник газу, звідки після розгону в системі сопел у вигляді струменів направляється на перфоровану пластину U-подібної форми. Аналогічно описаному механізму відбуваються інерційне осадження крапель на внутрішній поверхні корпусу і пластині, а також їх злиття з утворенням плівки.

Плівка під впливом сили тяжіння й потоку транспортується вниз і вздовж пористої пластини. З нижньої частини вихідної камери рідина видаляється через патрубок зливу. Низькоінерційні частинки надходять у сітковий коагулятор, де осаджуються за допомогою сепараційних градієнтних аерозольних технологій. Винесені потоком укрупнені краплі надходять у пакет хвилеподібних профілів з прямими вхідними та вихідними пластинами. Вихідні пластини профілів містять вертикальні відвідні канавки, через які відводиться рідина, уловлена на хвилеподібній частині профілів.

Використання пакета профілів істотно знижує габарити газоочисника і розширює інтервал витрат газу. Уловлена рідина стікає в піддон газоочисника і видаляється з його корпусу через відвідний патрубок. Очищений газ направляется у вихідну камеру, а з неї до відвідного патрубка.

5.2 3D-моделювання та дослідження сепараторів картерних газів двигунів внутрішнього згоряння

Конструктивна схема та рекомендація з побудови сепараторів картерних газів двигунів внутрішнього згоряння містять:

- рівень № 1 (INS) - технології інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) - технології градієнтної турбофоретичної сепарації.

Дослідження сепаратора проводилися розрахунковими методами за допомогою його тривимірної моделі при діапазоні витрат 2...10 м³/год (рис. 5.5) на експериментальному стенді та в реальних умовах у складі двигунів. Вивчалася газодинаміка потоку й аналізувалися коефіцієнти осадження за різних витрат [147].

Для розрахунку задавалися наступні параметри:

тривимірна геометрія побудована в реальному масштабі (довжина 80 мм і висота 5...25 мм);

– розрахункова сітка побудована з трикутних сегментів з площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$; параметри середовища – нормальні умови;

- густина газу $\rho_r = 1,225$ кг/м³;

- в'язкість $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$

– матеріал стінки каналу – алюміній із шорсткістю 0,1 мм і густиною $\rho_{a\pi} = 2690 \text{ кг/m}^3;$

– мінімальний діаметр частинок $d_{\min} = 3$ мкм;

– середній діаметр частинок $d_{\text{mid}} = 10$ мкм;

– максимальний діаметр частинок $d_{\text{max}} = 15$ мкм;

– концентрація рідкої фази $C_{\text{вх}} = 2...10 \text{ г/м}^3$;

- діапазон витрат $G = 2...10 \text{ м}^3/\text{год.}$



Рисунок 5.5 – Розрахункова модель сепаратора для діапазону витрат $G = 2...10 \text{ м}^3$ /год на основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій: *а)* вигляд збоку; *б)* вигляд знизу

Розрахунок тривимірної моделі

Виконано дослідження газодинаміки в проточній частині каналу та отримано значення коефіцієнтів осадження за різних концентрацій рідкої фази.

З графіків розподілу дослідження газодинаміки в проточній частині каналу (рис. 5.6 і 5.7) видно, що для G = 2...10 м³/год перепад тиску в сепаруючих коагуляторах досягає 0,2...3,5 кПа відповідно.

Розрахунок траєкторії руху частинок у каналі показав, що частинка пролітає весь канал за 0,2 с та її траєкторія збігається з лінією струму газового середовища в робочому каналі. Розрахунок розподілу швидкості в масловіддільнику при $G = 2...10 \text{ м}^3$ /год показав, що в каналі немає застійних зон і осадження частинок відбувається в зоні удару й розвороту струменя в каналі течії.

Виконані розрахунки осадження частинок у каналі сепаратора при $G = 2...10 \text{ м}^3$ год наведені в табл. 5.1 [147].



Рисунок 5.6 – Дослідження газодинаміки в проточній частині каналу при $G = 2 \text{ м}^3$ /год



Рисунок 5.7 – Дослідження газодинаміки в проточній частині каналу при $G = 10 \text{ м}^3$ год

Результати розрахунку при G = 2...10 м³/год показали, що коефіцієнт уловлювання частинок досягає 99 %.

Для досліджень був розроблений і виготовлений дослідний зразок сепаратора продуктивністю $G = 2...10 \text{ м}^3/\text{год}$ (рис. 5.8) [140]. Результати стендових випробувань подані в табл. 5.2.

З табл. 5.2 видно, що для коагулятора коефіцієнт сумарної ефективності очищення від крапель масла склав 99 %. Даний коефіцієнт отриманий при вхідній концентрації крапель до 10 г/м³, витратах газу 2...10 м³/год і температурі 20 °C. При цьому аеродинамічний опір віддільника склав 0,2...3,5 кПа, а вихідна концентрація масла в очищеному повітрі – до 10 мг/м³ [147].



Рисунок 5.8 – Дослідний зразок сепаратора продуктивністю *G* = 2...10 м³/год: *а*) тривимірна модель; *б*) діючий зразок

Таблиця 5.1 – Комп'ютерний розрахунок осадження в сепараторі при G =

2...10 м³/год

Витрата повітря <i>G</i> п, м/год	Концент- рація С _{вх} , г/м ³	Діаметр частинок, мкм	Коефіцієнт уловлювання, %	Уловлене масло, г/год	Аеро- динамічний опір, кПа	Темпе- ратура, ⁰С	
		3	74	0,90			
2	2	10	86	1,14	0,2		
		15	99	1,32			
		3	79	4,21			
4	4	10	89	4,74	0,8		
		15	99	5,28			
		3	85	10,2			
6	6	10	89	10,68	1,6	20	
		15	99	11,88			
		3	89	18,98			
8	8	10	93	19,84	2,5		
		15	99	21,12			
		3	89	29,66			
10	10	10 10		32,33	3,5		
		15	99	33,00			

Таблиця 5.2 – Експериментальне дослідження осадження у сепараторі при $G = 2...10 \text{ м}^3$ год на дослідному стенді

Витрата повітря <i>G</i> п, м/год	Концентрація $C_{\rm BX}, \Gamma/{\rm M}^3$	Коефіцієнт уловлювання, %	Уловлене масло, г/год	Аеродинамічний опір, кПа	Температура,°С
2,01	2		3,96	0,2	
3,95	4		15,84	0,8	
6,04	6	99	35,64	1,6	20 ± 2
7,04	8		61,44	2,5	
10,03	10		99,00	3,5	

Установлено, що розбіжність розрахунку та експериментальних даних не перевищує 10 %.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено:

- креслення сепаратора;

– робочі зразки обладнання [147].

5.3 3D-моделювання та дослідження сепараторів стиснутих газів енергосистем

Конструктивна схема та рекомендація з побудови сепараторів стиснутих газів енергосистем включають у себе:

- рівень № 1 (INS) - технології інерційної сепарації;

-рівень № 2 (GTUS) - технології градієнтної турбофоретичної сепарації.

Для стиснутого повітря низького і середнього тисків, тобто в діапазоні тисків 0,6...6,0 МПа, розроблено струминні сепаратори – масловологовіддільники.

Вони охоплюють інтервал витрат стиснутого повітря 50... 2000 м³/год і забезпечують очистку за 3-м класом чистоти (повністю уловлюють частинки більше 5 мкм).

Для стиснутого повітря низького і середнього тиску, тобто у діапазоні тисків від 0,6 до 6,0 МПа, розроблено універсальний струминний модуль.

Масловологовіддільники стиснутого газу створені за модульним принципом, тобто на наборі типових модулів на такі витрати: 100; 250; 500; 800 м³/год, та забезпечують очищення стиснутого повітря за 3-м класом очищення.

Модулі відрізняються лише прохідним перерізом сопел і коагулятора.

Модулі масловологовіддільника можуть розташовуватися на роздавальнику газу з різних боків. Для того щоб уникнути винесення крупних крапель у верхню частину корпусу, передбачене установлення козирка півциліндричної П-подібної форми.

Прохідний переріз оболонки збільшується в напрямку руху, що забезпечує гравітаційне осадження частинок, які виносяться з коагулятора в нижній частині корпусу та виводяться з корпусу через конденсатовідвідник.

Для розробки сепараторів для пневмосистем на основі сепараційних аерозольних технологій було побудовано розрахункові сітки у тривимірній постановці (рис. 5.9) [144].

265

Для розрахунку задавалися наступні параметри:

- тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі;

– розрахункова сітка побудована з трикутникових сегментів з площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2;$

- параметри середовища – нормальні умови;

- густина газу $\rho_r = 1,225 \text{ кг/м}^3$;

- в'язкість $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$

– матеріал стінки каналу – алюміній із шорсткістю 0,1 мм та густиною $\rho_{a\pi} = 2690 \text{ kr/m}^3;$

- мінімальний діаметр частинок 1 мкм;
- середній діаметр частинок 5 мкм;
- максимальний діаметр частинок 10 мкм;
- концентрація рідкої фази 1, 3, 6, 8, 10 %;
- діапазон витрат 50...800 м³/год.

Розрахунок тривимірної моделі

На рис. 5.10–5.13 подано розрахунок швидкості та тиску в тривимірній моделі сепаратора для пневмосистем на основі сепараційних аерозольних технологій із 1, 2, 4, 6 струминними модулями при витраті 50...800 м³/год [146].

Здійснено розрахунок осадження (табл. 5.3) у струминному модулі при діаметрі частинок 1...10 мкм, концентрації рідкої фази 1, 3, 6, 8, 10 % та діапазоні витрат 50...800 м³/год. Дослідження на стенді масловіддільника (G_{π} = 400, 600, 800 м³/год) наведені у табл. 5.4.

На рис. 5.14 зображений сепаратор стиснутих газів енергосистем СП 800 для витрат 400...800 м³/год [146].



Рисунок 5.9 – Тривимірна модель сепараторів стиснутого повітря з одним (а), двома (б), чотирма (в), шістьома (г) струминними модулями



Рисунок 5.10 – Розрахунок швидкості та тиску в тривимірній моделі сепаратора з одним струминним модулем при витраті 50 м³/год



Рисунок 5.11 – Розрахунок швидкості та тиску в тривимірній моделі сепаратора з двома струминними модулями при витраті 200 м³/год



Рисунок 5.12 – Розрахунок швидкості та тиску в тривимірній моделі сепаратора із чотирма струминними модулями при витраті 400 м³/год



Рисунок 5.13 – Розрахунок швидкості та тиску в тривимірній моделі сепаратора із шістьома струминними модулями при витраті 800 м³/год

	Струминні модулі сепаратора для пневмосистем																			
			1					2					4					6		
Діапазони	и Концентрація рідкої фази, %																			
витрат	1	3	6	8	10	1	3	6	8	10	1	3	6	8	10	1	3	6	8	10
Oca	Осадження рідкої фази (кількість осаджених частинок діаметром 1 мкм)																			
50	69	68	68	67	67															
100	68	67	67	67	9	69	66	68	65	64										
200						68	68	69	67	69	69	68	63	67	69					
400											68	67	64	67	69	69	63	63	67	65
800																68	67	66	67	64
Oca	Осадження рідкої фази (кількість осаджених частинок діаметром 5 мкм)																			
50	99	98	98	97	97															
100	98	97	97	97	99	99	98	98	98	98										
200						98	99	98	97	98	99	98	98	98	98					
400											98	97	97	97	99	99	98	98	99	98
800																98	97	99	97	98
Осад	жен	ня	рід	кої	фаз	и (к	ілы	сіст	ь ос	адж	кени	ах ч	асти	инон	с діа	мет	ром	100	МКІ	M)
50	100	100	100	100	100															
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100										
200						100	100	100	100	100	100	100	100	100	100					
400											100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
800																100	100	100	100	100

Таблиця 5.3 – Розрахунок коефіцієнта осадження

Таблиця 5.4 – Дослідження на стенді масловіддільника

$G_{\scriptscriptstyle \Pi}$, м 3 /год	<i>Т</i> _{вх см} , ^о С	$C_{\rm bx},$ кг/м 3	η_{Σ}	ΔP , кПа	$C_{ m bux}, \ \Gamma/{ m M}^3$	$g_{\text{винес}},$ мг/год
					61·10 ⁻³	24,4
400			99,9	3,1	59.10^{-3}	23,6
					$54 \cdot 10^{-3}$	21,6
					83·10 ⁻³	49,8
600	80	0,6			76·10 ⁻³	45,6
					81·10 ⁻³	48,6
					91·10 ⁻³	78,0
800					98·10 ⁻³	78,4
					$101 \cdot 10^{-3}$	80,8

Установлено, що розбіжність розрахунку та експериментальних даних не перевищує 10 %.

Сепаратори для пневмосистем на основі сепараційних аерозольних технологій призначені для очищення стиснутого повітря середнього тиску 0,6...6,0 МПа від крапель масла та води відповідно до 3-го класу чистоти за ISO 8573-1.



Рисунок 5.14 – Сепаратор стиснутих газів енергосистем: *а)* тривимірна модель; *б)* фото сепаратора

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено:

- креслення сепаратора;
- робочі зразки обладнання [140].

5.4 3D-моделювання та дослідження плоских неізотермічних градієнтних сепараторів газу

Конструктивна схема та рекомендація з побудови плоских неізотермічних градієнтних сепараторів для енергетичних установок містять:

- рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

Для дослідження впливу перепаду температур на процес уловлювання високодисперсних частинок трубчастому сепараторі розроблена V теплофізична модель і виконано розрахунок перенесення високодисперсних частинок у неізотермічних умовах; визначено вплив перепаду температур на процес уловлювання високодисперсних аерозолів, що дозволить у подальшому високоефективні газоочисні [140]. створювати пристрої Лослілження проводилися за допомогою комп'ютерного моделювання з наступною верифікацією результатами експерименту. Для розрахунку даних за застосовувалося транспортне рівняння напружень Рейнольдса і був виконаний розрахунок конвективного теплоперенесення за допомогою рівняння енергії. Розрахункова сітка сепаратора будувалася відповідно до геометрії робочої ділянки на експериментальному стенді за допомогою трикутних сегментів і має наступну геометрію: довжина 1 м; висота 0,3 м; ширина 0,3 м; 64 трубки з розміром 32×2 мм (рис. 5.15).

Для розрахунку задавалися наступні параметри:

- тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі;

– розрахункова сітка побудована з трикутникових сегментів із площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$;

перепад температур потоку і стінки встановлювався в межах 20...400 °C;
 параметри середовища – нормальні умови;

-густина газу $\rho_r = 1,225$ кг/м³;

-в'язкість $\mu_{\Gamma} = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$

матеріал стінки каналу – алюміній із шорсткістю 0,1 мм та густиною
 р_{ал} = 2690 кг/м³;

-мінімальний діаметр частинок $d_{\min} = 3$ мкм;

-середній діаметр частинок $d_{\text{mid}} = 10$ мкм;

– максимальний діаметр частинок $d_{\text{max}} = 15$ мкм;

-концентрація полідисперсної фази 1...20 %;

-діапазон витрат $G = 100...500 \text{ м}^3/\text{год.}$

Розрахунок тривимірної моделі

Виконано розрахунок температурного поля (рис. 5.16) у сепараторі за витрати газу 40 м³/год при $T_0 = 400$ °C, на вході $T_{води} = 20$ °C.

Розрахунки показали, що зниження температури газу із 400 до 150 °С і значний градієнт температур дозволяють використовувати неізотермічну градієнтну технологію для осадження високодисперсного аерозолю [160].

Результати досліджень показали, що осадження високодисперсних частинок на поверхні каналу за наявності перепаду температур відбувається за рахунок спільної дії сил інерції, турбо- і неізотермічної градієнтної технології.

Застосування в аерозольних градієнтних технологіях перепаду температур дозволить підвищити їх ефективність при незначних енергетичних і матеріальних витратах.

Перепад температур уздовж циліндричного каналу 30...250 °C дозволяє підвищити ефективність осадження за рахунок неізотермічної градієнтної технології від 14 до 20 %.

Для початкової швидкості $U_0 = 7$ м/с при тій же зміні різниці температур відповідно вихідна концентрація $C_{\text{вих}}$ складає 30,2 і 14,3 мг/м³. Концентрація аерозолю зменшується зі збільшенням швидкості. Коефіцієнт уловлювання при збільшенні швидкості потоку від 5 до 7 м/с при 250 °С складає 90 %, що на 20 % більше, ніж при 0 °С. Тобто надбавка до осадження за рахунок сил неізотермічної градієнтної технології може складати 14...20 %.



Рисунок 5.15 – 3D-модель геометрії робочої ділянки на експериментальному стенді

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено:

– креслення для модельного ряду плоских неізотермічних градієнтних сепараторів газу;

– робочі зразки обладнання.



Рисунок 5.16 – Розподіл поля температур у плоскому сепараторі за витрати газу 40 м³/год при *T*₀ = 400 °С, на вході *T*_{води} = 20 °С: *а*) 2-а секунда; *б*) 4-а секунда; *в*) 6-а секунда; *г*) 8-а секунда; *д*) 10-а секунда; *е*) 12-а секунда; *ж*) 14-а секунда; *и*) 16-а секунда

Здійснено розрахунок осадження (табл. 5.5) при діаметрі частинок 3...10 мкм, та діапазоні витрат 100...500 м³/год. У табл. 5.6 наведено результати

стендових випробувань неізотермічного сепаратора. Установлено, що розбіжність розрахунку та експериментальних даних не перевищує 10 %. Неізотермічний градієнтний сепаратор газу зображений на рис. 5.17 [140].

Таблиця 5.5 – Розрахунок осадження неізотермічного сепаратора при $G = 100...500 \text{ м}^3/\text{год}$

	Початкові умови						Без охолодження			3 охолодженням		
<i>G</i> п, м ³ /год	<i>Т</i> _{вх} , °С	<i>Т</i> _{охол.} , °С	С _{вх} , г∕м ³	$d_{\min},$ мкм	$d_{ m mid},$ мкм	$d_{ m max},$ мкм	d _{min} , g _{винес} , г/год	$d_{ m mid},\ g_{ m винес},\ \Gamma/\Gamma O Д$	d _{max} , g _{винес} , г/год	d _{min} , g _{винес} , г/год	$d_{ m mid},$ $g_{ m винес},$ г/год	d _{max} , g _{винес} , г/год
100							8,2		0	6,1		
200							14,3		0	9,2		
300	80	20	0,6	3	10	15	15,5	1	1	11,7	0	0
400							19,3		0	14,2		
500							22,8		1	16,4		

Таблиця 5.6 – Результати стендових випробувань неізотермічного

сепаратора при	G =	100	.500	м ³ /год
----------------	-----	-----	------	---------------------

$G_{\scriptscriptstyle \Pi}$, м 3 /год	<i>С</i> _{вх} , г/м ³	Наявність охол. коаг.	Коеф. сум. еф. ηΣ, %	Аеродин. опір <i>ΔР</i> , кПа	Вхідна темп. <i>T</i> ₀ ,°C	Конц. на виході, С _{вих} , мг/м ³
100				1,4		12,1
200			00.0	2,0	80	21,2
300	0.2 1.5	без		2,5		29,4
400				2,8		38,8
500				3,2		46,8
100	0,51,5		,,,,	1,4		8,2
200				2,0		12,6
300		20		2,5		14,7
400				2,8		21,6
500				3,2		24,8







Рисунок 5.17 – Плоский неізотермічний сепаратор газу: *а)* тривимірна модель; *б)* фото сепаратора

5.5 3D-моделювання та дослідження циліндричних неізотермічних градієнтних сепараторів газу енергетичних установок

Конструктивна схема та рекомендація з побудови циліндричних неізотермічних градієнтних сепараторів для енергетичних установок включають у себе:

- рівень № 1 (INS) технології інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технології градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технології градієнтної неізотермічної сепарації.

На основі базових конструкцій можливе створення очисників для уловлювання аерозолів у таких системах: багатоконтурного піролізу; суфлювання ГТД; вентиляції картера ДВЗ; вентиляції маслобаків головних циркуляційних насосів турбін AEC; комфортного і технічного кондиціонування; вентиляції редукторів головних турбозубчатих агрегатів, очищення стиснутого повітря; сушіння харчових і медичних препаратів та ін.

Розроблена тривимірна модель циліндричного неізотермічного градієнтного сепаратора газу енергетичних установок (рис. 5.18) [140].



Рисунок 5.18 – Тривимірна модель циліндричного неізотермічного градієнтного сепаратора газу енергетичних установок

Для розрахунку задавалися наступні параметри:

- тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі;

– розрахункова сітка побудована з трикутникових сегментів із площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2;$

- перепад температур потоку і стінки встановлювався в межах 20...400 °С;

- параметри середовища нормальні умови;
- густина газу $\rho_r = 1,225 \text{ кг/м}^3$;
- в'язкість $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$
- матеріал стінки каналу алюміній із шорсткістю 0,1 мм та густиною $\rho_{a\pi} = 2690 \text{ кг/m}^3;$
 - мінімальний діаметр частинок $d_{\min} = 3$ мкм;
 - середній діаметр частинок $d_{\text{mid}} = 10$ мкм;
 - максимальний діаметр частинок $d_{\text{max}} = 15$ мкм;
 - концентрація рідкої фази 1...20 %;
 - діапазон витрат $G = 1...140 \text{ м}^3/\text{год.}$

Ураховуючи підвищену концентрацію високодисперсних частинок для таких умов, рекомендується використовувати сепаратор із трьома секціями охолоджуваного коагулятора.

Як секції такого очисника застосовуються розроблені й випробувані очисники з кільцевим сітковим коагулятором. Дослідження ефективності очищення від тютюнового диму такими очисниками показали, що ефективність очищення складає до 80...90 % при використанні водяної пари як гріючого теплоносія.

Розрахунок тривимірної моделі

Здійснено розрахунки розподілу швидкості та температури у робочому каналі при виході на режим. На рис. 5.19–5.22 подано результати розрахунків розподілу температурного поля та розподілу швидкостей у робочому каналі тривимірної моделі неізотермічного градієнтного сепаратора при витраті газу 40...120 м³/год. У табл. 5.7 і 5.8 наведено розрахунок та дослідження осадження у сепараторі при G = 40...140 м³/год.

Установлено, що при витраті газу 40 м³/год. вихідна концентрація без охолодження складає 8,1 г/год, а з охолодженням – 2,6 г/год. При витраті газу 80 м³/год вихідна концентрація без охолодження складає 10,4 г/год, а з охолодженням – 3,6 г/год. При витраті газу 120 м³/год вихідна концентрація без охолодження складає 12,8 г/год, а з охолодженням – 4,1 г/год. Підвищення ефективність вхідної температури середовища знижує уловлювання високодисперсного аерозолю за рахунок збільшення парової фази й кількості дрібних частинок. Так, при $\Delta T = 60$ °C спостерігається зменшення вихідної концентрації високодисперсного аерозолю до 20 % при витраті газу 40 м³/год. Дослідження ефективності віддільника при охолодженні сіткового коагулятора до 20 °С показало позитивний вплив на якість очищення ефекту охолодження. Так, охолодження коагулятора до температури 20 °C при температурі газомасляного середовища 80 °C при витраті газу 120 м³/год дозволяє зменшити вихідну концентрацію високодисперсного аерозолю на 25 %.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено:

- креслення сепаратора;

– робочі зразки обладнання.

Циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор зображений на рис. 5.23.



Рисунок 5.19 – Результати розрахунків розподілу температурного поля при витраті газу 40 м³/год



Рисунок 5.20 – Результати розрахунків розподілу швидкості при витраті газу 40 м³/год



Рисунок 5.21 – Результати розрахунків розподілу температурного поля при витраті газу 120 м³/год



Рисунок 5.22 – Результати розрахунків розподілу швидкості потоку при витраті газу 120 м³/год

	Початкові умови						Без охолодження			3 охолодженням		
<i>G</i> п, м ³ /год	<i>Т</i> _{вх} , °С	<i>Т</i> _{охол.} , °С	С _{вх} , г∕м ³	$d_{ m min}$, мкм	$d_{ m mid},$ мкм	$d_{ m max}$, мкм	d _{min} , g _{винес} , г/год	d _{mid} , g _{винес} , г/год	d _{max} , g _{винес} , г/год	d _{min} , g _{винес} , г/год	d _{mid} , g _{винес} , г/год	<i>d</i> _{max} , <i>g</i> _{винес} , г/год
40							8,2		0	6,1		
60							14,3		0	9,2		
80	80	20	0.6	3	10	15	15,5	1	1	11,7	0	0
100	00	20	0,0	5	10	15	19,3	1	0	14,2	0	0
120							22,8		1	16,4		
140							26,3		1	20,8		

Таблиця 5.7 – Розрахунок осадження у сепараторі при $G = 40...140 \text{ м}^3$ /год

Таблиця 5.8 – Результати стендових випробувань неізотермічного сепаратора

		Наявність	Коеф.	Аеродин.	Вхідна	Конц. на
$G_{\scriptscriptstyle \Pi}$, м 3 /год	$C_{\text{вх}}, \Gamma/\text{м}^3$	охол. коаг.	сум. еф.	опір	темп.	виході,
			ηΣ, %	ΔP , кПа	$T_0, {}^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$	$C_{\text{вих}}$, мг/м ³
40,0				1,4		8,1
60,0				2,0		10,2
80,0		_		2,5		10,4
100,0				2,8		11,8
120,0				3,2		12,8
140,0	03 15		99 9	4,0	80	13,2
40,0	0,51,5		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	1,4		2,6
60,0				2,0		3,7
80,0		20		2,5		3,6
100,0		20		2,8		3,8
120,0				3,2		4,1
140,0				4,0		4,7



б)

Рисунок 5.23 – Циліндричний неізотермічний сепаратор: *а)* тривимірна модель; *б)* фото зразка

5.6 3D-моделювання та дослідження суднових систем очищення повітря від краплинної вологи

Конструктивна схема та рекомендація з побудови суднових систем очищення повітря від краплинної вологи містять:

– рівень № 1 (INS) – технології інерційної сепарації.

– рівень № 2 (GTUS) – технології градієнтної турбофоретичної сепарації.

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 сепаратора 1000×500×80 мм; побудована розрахункова сітка (рис. 5.24) [144].

Для розрахунку задавалися наступні параметри:

-тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі 1000×500×80 мм;

– розрахункова сітка побудована з трикутникових сегментів із площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$;

- параметри середовища - нормальні умови;

-густина газу $\rho_r = 1,225$ кг/м³;

-в'язкість $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$

– матеріал стінки каналу – алюміній із шорсткістю 0,1 мм та густиною

 *ρ*_{ал} = 2690 кг/м³;

-мінімальний діаметр частинок $d_{\min} = 3$ мкм;

-середній діаметр частинок $d_{\text{mid}} = 100$ мкм;

-максимальний діаметр частинок $d_{\text{max}} = 150$ мкм;

-концентрація рідкої фази (H₂O) – 5, 10, 15, 20 %;

-діапазон швидкостей 1...10 м/с.

Розрахунок тривимірної моделі

Здійснено розрахунок швидкості в робочому каналі (рис. 5.25) [144].



Рисунок 5.24 – Загальна схема суднових систем очищення повітря від краплинної вологи (тривимірна модель сепаратора)


Рисунок 5.25 – Розрахункова сітка (*a*) та розрахунок швидкості (б) для моделі сепаратора 1000×500×80 мм

Процеси у суднових системах очищення повітря від краплинної вологи підпорядковані двом головним завданням: осадженню краплей на поверхні сепаруючих профілів і відведенню вловленої води в збірник-піддон без пошкодження плівки води, що утворилася, тобто без вторинного обводнення потоку. У криволінійному каналі краплі води, що транспортуються повітряним потоком під дією інерційних сил, осаджуються як на опуклій (лобовій), так і на вгнутій частині каналу [144].

У суднових кондиціонерах швидкість повітря на вході лежить у межах 2...10 м/с, концентрація краплинної вологи досягає 30 г/кг, середній ваговий діаметр краплей при розпилюванні води механічними форсунками досягає 100...150 мкм, при зриві плівки з кромок – 200 мкм.

У результаті розрахункових та експериментальних досліджень на дослідному стенді у вигляді аеродинамічної труби відкритого типу процесів осадження краплинної вологи при початковій швидкості у каналі U = 1...10 м/с була встановлена максимальна концентрація рідкої фази для сепаруючого профілю (табл. 5.9 і 5.10). Дисперсна повітряно-водяна суміш готувалася в камері змішувача за допомогою механічних і пневматичних форсунок. Дисперсність визначалася методом дотику, тобто шляхом нанесення крапель на дзеркальні пластини з подальшим фотографуванням. Сепаруюча здатність визначалася трьома способами: матеріальним балансом, методом дотику і методом фільтрації за допомогою аналітичних фільтрів Петрянова.

Проведений аналіз показав, що в сепараційних каналах краплі осаджуються на опуклій і вгнутій частинах профілю в порівнювальних кількостях. Унаслідок цього на сепаруючих профілях для запобігання вторинному обводненню потоку необхідно встановлювати двосторонні водовідвідні елементи. Характерною особливістю розроблених сепаруючих профілів є поєднання хвилеподібної частини з плоскими вхідними та вихідними ділянками. У зборі сепаруючі профілі утворюють криволінійні канали з рядом послідовних конфузорних і дифузорних ділянок [144, 151, 152].

290

Таблиця 5.9 – Результати розрахункових досліджень коефіцієнта осадження для сепаратора 1000×500×80 мм

U,	Концентрація рідкої фази у потоці,%												
м/с		5			10			15			20		
	d_{\min}	$d_{ m mid}$	d_{\max}	d_{\min}	$d_{ m mid}$	d_{\max}	d_{\min}	$d_{ m mid}$	d_{\max}	d_{\min}	$d_{ m mid}$	d_{\max}	
1	90,1			85,9			83,9			82,8			
2	90,3			85,6			83,6			82,2			
3	90,6			85,2			83,3			81,9			
4	90,0			85,4			83,2			81,6			
5	90,4	99.9	100	85,1	99.9	100	83,1	99.9	100	81,2	99.9	100	
6	90,1	,,,,,	100	84,5	,,,,,	100	82,7	, ,,,,	100	80,8	,,,,,	100	
7	90,2			84,1			82,3			80,4			
8	89,9			83,9			81,9			80,2			
9	89,4			83,6			81,5			79,8			
10	89,1			83,1			81,1			79,1			

Таблиця 5.10 – Результати експериментальних досліджень коефіцієнта осадження для сепаратора 1000×500×80 мм

	Концентрація рідкої фази у потоці, %															
<i>U</i> , м/с	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
1						94,9	91,4	90,6	81,1	79,2	75,0	71,9	67,8	61,7	55,4	53,1
2						94,1	91,9	91,3	81,8	78,4	75,1	71,2	66.4	62,9	55,4	51,9
3						95,9	91,0	91,6	81,9	79,3	74,8	70,9	67.7	63,8	54,2	50,4
4					9,9 99,9	95,4	91,1	91,2	81,3	78,9	74,1	69,0	68.5	62,3	55,2	51,1
5	99,9	99,9	99,9	99.9		95,1	91,9	90,2	80,3	79,6	73,0	68,8	69.4	61,3	54,2	51,9
6						90,1	84,8	89,9	78,9	71,9	68,9	61,9	63.2	54,1	49,9	45,9
7						82,9	82,5	82,2	74,1	69,2	62,1	57,1	53.9	49,4	44,1	39,9
8						80,3	79,3	74,9	70,7	64,3	57,8	52,0	47.3	41,6	37,8	32,9
9					78,2	77,1	71,2	66,4	59,9	51,2	45,7	41.2	36,7	32,5	26,9	
10						83,9	75,9	69,9	61,9	54,9	46,9	41,8	35.9	31,9	28,2	24,9

Установлено, що розбіжність розрахунку та експериментальних даних не перевищує 10 %.

У дифузорних ділянках виникають відривні зони зі зворотною течією газу. Плівка рідини, яка виникає внаслідок осадження крапель, потрапляючи в ці зони, схильна до впливу вихорів, які протидіють руху плівки в напрямку основного потоку і сприяють її стоку під дією сили тяжіння.

Вихрові зони забезпечують повне відведення вловленої води з поверхні гладкого профілю до певної швидкості 5 м/с. Перевищення цієї швидкості призводить до винесення частини води з вихрових зон. Для запобігання вторинному обводненню потоку на плоских ділянках сепаруючого профілю передбачені водовідвідні елементі.

У системах кондиціонування з поверхневими теплообмінниками головним джерелом краплинної вологи є повітроохолоджувачі. Конденсатна плівка зривається повітряним потоком з кромок теплообмінної поверхні, утворюючи краплі. У системах з контактними апаратами повітря, яке обробляється, насичується краплями води у форсункових камерах, плівкових апаратах та ін. Розміри крапель залежать від розпилювання, умов відриву частинок води від поверхні, а також характеру взаємодії відірваних частинок з повітряним потоком. Під впливом аеродинамічних сил крупні краплі можуть подрібнюватися. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що розпад краплей під впливом аеродинамічних сил визначається числом Вебера. Коли число Вебера більше 14, то всі краплі подрібнюються, причому краплі, які утворються, тим менші, чим більше число Вебера.

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.

На рис. 5.26 показана типова конструкція суднової системи очищення повітря від краплинної вологи з однорядним пакетом сепаруючих профілів з параметрами 500×250×80 мм; 1000×500×80 мм; 2000×1000×80.

Випробування цих водовіддільників показали, що коефіцієнт уловлювання при водності до 50 г/кг і швидкості повітря на вході до 10 м/с практично дорівнював 100 %. Результати дослідження аеродинамічного опору показали, що аеродинамічний опір при швидкості 5 м/с дорівнює 50 Н/м² [144].



Рисунок 5.26 – Типова конструкція суднової системи очищення повітря від краплинної вологи з однорядним пакетом сепаруючих профілів з параметрами: *а*) 500×250×80 мм; *б*) 1000×500×80 мм; *в*) 2000×1000×80 мм; *г*) робочий зразок обладнання

5.7 3D-моделювання та дослідження масловіддільників систем суфлювання газотурбінних двигунів 4-го покоління

5.7.1 Розробка модернізованого акустикофоретичного масловіддільника систем суфлювання газотурбінних двигунів 4-го покоління ДН 80 і ДГ 90 з витратою газу до 200 м³/год

Конструктивна схема та рекомендація з побудови акустикофоретичного масловіддільника систем суфлювання ГТД 4-го покоління включають у себе:

- рівень № 1 (INS) - технології інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) – технології градієнтної турбофоретичної сепарації;

– рівень № 4 (GAFS) – технології градієнтної акустикофоретичної сепарації.

На основі багаторівневих сепараційних градієнтних аерозольних технологій розроблено модернізований сепаратор систем суфлювання ГТД з витратою газу до 200 м³/год (рис. 5.27) [140].

Для розрахунку задавалися наступні параметри:

- тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі;

– розрахункова сітка побудована з трикутникових сегментів із площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2;$

- параметри середовища нормальні умови;
- густина газу $\rho_{\Gamma} = 1,225 \text{ кг/м}^3$;
- в'язкість $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$

– матеріал стінки каналу – алюміній із шорсткістю 0,1 мм та густиною

 $\rho_{a\pi} = 2690 \text{ кг/м}^3;$

- мінімальний діаметр частинок $d_{\min} = 3$ мкм;
- середній діаметр частинок $d_{\text{mid}} = 100$ мкм;
- максимальний діаметр частинок $d_{\text{max}} = 150$ мкм;
- концентрація рідкої фази (H₂O) 5, 10, 15, 20 %;
- діапазон витрат G = 100...200 м³/год.

Розрахунок тривимірної моделі

На основі розробленої математичної моделі виконано дослідження газодинаміки в проточній частині каналу й отримані значення коефіцієнтів осадження за різних концентрацій рідкої фази.

На рис. 5.28 наведений розподіл швидкості, а на рис. 5.29 — розподіл статичного тиску за витрат $G = 100...200 \text{ м}^3/\text{год.}$

Як видно з розрахунку, при $G = 100 \text{ м}^3$ /год спостерігається підвищення швидкості в соплах газоочисника до 37 м/с. При проходженні потоком сепаруючих коагуляторів осереднене значення швидкості не перевищує 15 м/с, а у профілях осадження швидкість не перевищує 5 м/с.

Для $G = 200 \text{ м}^3$ /год спостерігається підвищення швидкості в соплах газоочисника до 55 м/с. При проходженні потоком сепаруючих коагуляторів осереднене значення швидкості не перевищує 23 м/с, а у профілях осадження швидкість не перевищує 10 м/с. З графіків розподілу статичного тиску (див. рис. 5.29) видно, що для $G = 100...200 \text{ м}^3$ /год перепад тиску в сепаруючих коагуляторах досягає 2,5...3,9 кПа відповідно.

У табл. 5.9 наведені розрахунки осадження частинок у пульсаційному ультразвуковому сепараторі.

Як видно з розрахунків, підвищення коефіцієнта осадження за рахунок ультразвукового сепараційного елемента досягає 25,1 %.

Для досліджень був розроблений і виготовлений дослідний зразок газоочисника продуктивністю 100...200 м³/год, що відповідає витраті маслоповітряного середовища в системах суфлювання ГТД 4-го покоління ДН 80 і ДГ 90 [154].

Результати стендових випробувань подані в табл. 5.11-5.13.

Для коагулятора коефіцієнт сумарної ефективності очищення від крапель масла при їх вхідній концентрації до 1,5 кг/м³, витратах газу 100... 200 м³/год за температури 80 °C склав 99,9 %.

295



Рисунок 5.27 – Тривимірна модель сепаратора G = 100...200 м³/год на основі багаторівневих градієнтних аерозольних технологій: *а)* тривимірна модель; *б)* тривимірна розрахункова сітка

a)

б)



Рисунок 5.28 – Розрахунок швидкості у сепараторі: *a*), б) при $G = 200 \text{ м}^3/\text{год}$; *в*) при $G = 100 \text{ м}^3/\text{год}$



Рисунок 5.29 – Розрахунок статичного тиску в сепараторі: *а)*, *б*) при $G = 200 \text{ м}^3$ /год; *в*) при $G = 100 \text{ м}^3$ /год

	Початкові умови						Без пульсації			3 пульсаціями		
<i>G</i> п, м ³ /год	<i>Т</i> _{вх} , °С	С _{вх} , кг/м ³	$d_{ m min}$, MKM	$d_{ m mid},$ МКМ	$d_{ m max},$ мкм	$d_{\min}, \ g_{\text{винес}}, \ \Gamma/\Gamma O Д$	<i>d</i> _{mid} , <i>g</i> _{винес} , г∕год	d _{max} , g _{винес} , г/год	$d_{\min}, \ g_{\text{винес}}, \ \Gamma/\Gamma O Д$	<i>d</i> _{mid} , <i>g</i> винес, г∕ год	d _{max} , g _{винес} , г/год	Σ ПСЕ, %
100		0.6			15	6,2		0	4,1			41,1
120						9,3		0	7,2	1	0	25,6
140	00		2	10		12,5	1	1	10,7		23,9	
160	00	0,0	3	10		16,3		0	13,2	0		21,8
180						18,8		1	16,4	1	1	13,0
200						22,4	2		17,3	2		25,1
Осереднене значення									25,1			

Таблиця 5.11 — Розрахунок осадження у сепараторі при $G = 100...200 \text{ м}^3/год$

Таблиця 5.12 — Дослідження осадження у сепараторі при $G = 100 \text{ м}^3$ /год

<i>G</i> п, м ³ /год	<i>Т</i> _{вх см} , °С	С _{вх} , кг∕м ³	η_{Σ}	∆ <i>Р</i> , кПа	$C_{\scriptscriptstyle \mathrm{BUX}},$ г/м 3	<i>g</i> _{винес} , г/год	С _{вих} , г/м ³ ПСЕ	<i>g</i> _{винес} , г/год ПСЕ	$\Sigma \Pi CE$
100					70.10^{-3}	7	$54 \cdot 10^{-3}$	5,4	29,6
100	-				$83 \cdot 10^{-3}$	8,3	$61 \cdot 10^{-3}$	6,1	36,0
100		0,6			$75 \cdot 10^{-3}$	7,5	$55 \cdot 10^{-3}$	5,5	36,3
100	80		00.0	2,5	$83 \cdot 10^{-3}$	8,3	60.10^{-3}	6,0	38,3
100	80		99,9		$78 \cdot 10^{-3}$	7,8	54·10 ⁻³	5,4	44,4
100					$84 \cdot 10^{-3}$	8,4	59·10 ⁻³	5,9	42,3
100					$75 \cdot 10^{-3}$	7,5	$53 \cdot 10^{-3}$	5,3	41,5
100					78.10^{-3}	7,8	52.10^{-3}	5,2	50,0
Осереднене значення					78,25·10 ⁻³	7,825	56 ·10 ⁻³	5,6	39,8

Таблиця 5.13 – Дослідження осадження у сепараторі при $G = 200 \text{ м}^3/\text{год}$

<i>G</i> п, м ³ ∕год	<i>Т</i> _{вх см} , °С	С _{вх} , кг/м ³	η_{Σ}	∆ <i>Р</i> , кПа	$C_{\text{вих}}, \Gamma/\text{M}^3$	<i>g</i> винес, г/год	С _{вих} , г/м ³ ПСЕ	<i>g</i> винес, г/год ПСЕ	$\Sigma \Pi CE$
200					140.10^{-3}	28,0	110.10^{-3}	22,0	27,27273
200					144.10-3	28,8	$114 \cdot 10^{-3}$	22,8	26,31579
200	1				$135 \cdot 10^{-3}$	27,0	110.10^{-3}	22,0	22,72727
200	80	0,6	99,9	3.9	139.10 ⁻³	27,8	$108 \cdot 10^{-3}$	21,6	28,7037
200	1				$148 \cdot 10^{-3}$	29,6	$115 \cdot 10^{-3}$	23,0	28,69565
200]				$142 \cdot 10^{-3}$	28,4	$113 \cdot 10^{-3}$	22,6	25,66372
200					$144 \cdot 10^{-3}$	28,8	$117 \cdot 10^{-3}$	23,4	23,07692
200					$138 \cdot 10^{-3}$	27,6	110.10^{-3}	22,0	25,45455
Осереднене значення				141.10-3	28,2	112·10 ⁻³	22,4	25,98879	

При цьому аеродинамічний опір віддільника складав 2,5...3,9 кПа, а вихідна концентрація масла в очищеному повітрі – до 13,2 мг/м³. Підвищення вхідної температури газомасляного середовища знижувало ефективність уловлювання високодисперсного аерозолю за рахунок збільшення парової фази масла і кількості найдрібніших частинок.

Дослідження ефективності уловлювання при пульсації сіткового коагулятора з відповідною частотою $u_y = 2 \cdot A \cdot \pi \cdot \vartheta \cos(2\pi \cdot \vartheta)$, де A = 0,00002 мм – амплітуда; $\vartheta = 10000$ Гц – частота коливань, показало позитивний вплив на якість очищення. Так, пульсація коагулятора майже в три рази знизила вихідну концентрацію масла. Загальні втрати масла за наявності пульсаційного коагулятора знижуються приблизно на $\Sigma_{\Pi CE} = 30$ % (сумарний пульсаційний сепараційний ефект) при зростанні аеродинамічного опору на 10 %. Таким чином, за рахунок використання пульсаційного коагулятора можна виконувати уловлювання парів масла до їх насиченого стану при температурі подачі холодного масла.

Установлено, що коефіцієнт сумарної ефективності перевищує 99,9 %. Вихідна концентрація масляного аерозолю на режимах витрат повітря 100...200 м³/год склала 56·10⁻³ та 112·10⁻³ г/м³ відповідно. Аеродинамічний опір 2,5...3,9 кПа.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено:

креслення акустикофоретичного масловіддільника систем суфлювання
 ГТД 4-го покоління ДН 80 і ДГ 90 [154];

– робочі зразки обладнання.

На рис. 5.30 наведений сепаратор G = 100...200 м³/год на основі багаторівневих градієнтних сепараційних технологій [143].

Установлено, що розбіжність розрахунку та експериментальних даних не перевищує 10 %.

300



Рисунок 5.30 – Сепаратор з ультразвуковим модулем для G = 100...200 м³/год на основі багаторівневих градієнтних сепараційних технологій: *а)* фото генератора пульсацій; б) електричний модуль пульсатора; *в)* тривимірна модель сепаратора; *г)* фото сепаратора; *д)* пульсаційний модуль

5.7.2 Розробка модернізованого акустикофоретичного масловіддільника систем суфлювання газотурбінних двигунів 4-го покоління ДН 80 і ДГ 90 з витратою газу 400...800 м³/год

Конструктивна схема та рекомендація з побудови акустикофоретичного масловіддільника систем суфлювання ГТД 4-го покоління містять:

- рівень № 1 (INS) - технології інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) - технології градієнтної турбофоретичної сепарації;

– рівень № 4 (GAFS) – технології градієнтної акустикофоретичної сепарації.

На основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій розроблено модернізований акустикофоретичний сепаратор систем суфлювання ГТД з витратою газу до 400...800 м³/год (рис. 5.31).

Для розрахунку задавалися наступні параметри:

- тривимірна геометрія побудована у реальному масштабі;

– розрахункова сітка побудована з трикутникових сегментів із площею $S = 30 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2;$

- параметри середовища – нормальні умови;

- густина газу $\rho_{\Gamma} = 1,225 \text{ кг/м}^3$;

– в'язкість $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)};$

матеріал стінки каналу – алюміній із шорсткістю 0,1 мм та густиною
 р_{ал} = 2690 кг/м³;

– мінімальний діаметр частинок $d_{\min} = 3$ мкм;

- середній діаметр частинок $d_{\text{mid}} = 100$ мкм;
- максимальний діаметр частинок $d_{\text{max}} = 150$ мкм;
- концентрація рідкої фази (H₂O) 5, 10, 15, 20 %;
- діапазон витрат G = 400...800 м³/год.

Розрахунок тривимірної моделі

3 графіків розподілу статичного тиску (рис. 5.32) видно, що для $G = 400 \text{ м}^3$ /год перепад тиску в сепаруючих коагуляторах досягає 5,1 кПа.

Розрахунок траєкторії руху частинок у каналі показав, що траєкторія збігається з лінією струму газового середовища в робочому каналі. На рис. 5.33 наведено розподіл швидкості в масловіддільнику при G = 400, 600, 800 м³/год [145].

З розрахунку розподілу швидкості в масловіддільнику при $G = 400 \text{ м}^3/\text{год}$ визначено, що швидкість у коагуляційному профілі не перевищує 10 м/с.

Розрахунок осадження частинок у масловіддільнику при $G = 400, 600, 800 \text{ м}^3$ год поданий у табл. 5.14.

Результати розрахунку при $G = 400 \text{ м}^3$ /год показали, що сумарний пульсаційний ефект осадження високодисперсних частинок досягає 25,1 %.

Для досліджень був розроблений і виготовлений дослідний зразок газоочисника продуктивністю 400 м³/год.

Результати стендових випробувань наведені в табл. 5.15, з якої видно, що для коагулятора коефіцієнт сумарної ефективності очищення від крапель масла склав 99,9 % [145].

Даний коефіцієнт отриманий при вхідній концентрації крапель до 0,6 кг/м³, витратах газу 400...800 м³/год і температурі 80 °C [145].

При цьому аеродинамічний опір віддільника склав 6,1 кПа, а вихідна концентрація масла в очищеному повітрі при витраті газу 400 м³/год $C_{\text{вих}} = 59 \cdot 10^{-3} \text{ г/m}^3.$

Сумарний пульсаційний ефект осадження високодисперсних частинок досягає 34,7 %.

На рис. 5.34 наведений сепаратор G = 400...800 м³/год на основі багаторівневих градієнтних сепараційних технологій [143].

303



Рисунок 5.31 – Тривимірна модель газоочисника $G = 400 \text{ м}^3$ /год на основі сепараційних градієнтних аерозольних технологій: а) тривимірний вигляд для побудови розрахункової сітки; б) тривимірна розрахункова сітка скінченних елементів



Рисунок 5.32 – Розподіл статичного тиску в масловіддільнику: *a*), *б*) при $G = 400 \text{ м}^3/\text{год}$; *в*), *г*) при $G = 600 \text{ м}^3/\text{год}$; *д*), *е*) при $G = 800 \text{ м}^3/\text{год}$



Рисунок 5.33 – Розподіл швидкості в масловіддільнику: *a*), *б*) при $G = 400 \text{ м}^3/\text{год}$; *в*), *г*) при $G = 600 \text{ м}^3/\text{год}$; *д*), *е*) при $G = 800 \text{ м}^3/\text{год}$

Таблиця 5.14 — Розрахунок осадження у масловіддільнику при $G = 400, 600, 800 \text{ м}^3$ год

	Початкові умови					Без пульсації сітки			З пульсаціями сітки			N.
<i>G</i> п, м ³ /год	<i>Т</i> _{вх см} , °С	С _{вх} , кг/м ³	$d_{ m min},$ мкм	$d_{ m mid},$ мкм	d _{max} , мкм	d _{min} , g _{вынес} , мг/год	d _{mid} , g _{вынес} , г/год	d _{max} , g _{вынес} , г/год	$d_{\min},$ $g_{\mathrm{вынес}},$ мг/год	$d_{ m mid},\ g_{ m вынес},\ { m M} \Gamma/ \Gamma O { m J}$	d _{max} , g _{вынес} , мг/год	Σ _{ΠCE} , %
400						22,4			17,3			25,1
600	80	0,6	3	10	15	16,3	0	0	13,2	0	0	21,8
800						18,8			16,4			13,0

Таблиця 5.15 — Дослідження масловіддільника. $G = 400, 600, 800 \text{ м}^3/\text{год}$

<i>G</i> п, м ³ /год	<i>Т</i> _{вх см} , °С	С _{вх} , кг/м ³	η_{Σ}	<i>ΔР</i> , кПа	$C_{\scriptscriptstyle \mathrm{BHX}}, \ \Gamma/\mathrm{M}^3$	<i>g</i> вынес, мг/год	С _{вих} , г/м ³ ПСЕ	<i>g</i> _{вынес} , мг/год ПСЕ	Σ _{ΠCE} , %
					$62 \cdot 10^{-3}$	24,8	$41 \cdot 10^{-3}$	16,4	33,8
400					69·10 ⁻³	27,6	$45 \cdot 10^{-3}$	18,0	34,7
					59·10 ⁻³	23,6	44.10^{-3}	17,6	25,4
					83·10 ⁻³	49,8	64.10-3	38,4	22,8
600	80	0,6	99,9	2,5	77.10-3	46,2	67·10 ⁻³	40,2	12,9
					81·10 ⁻³	48,6	63·10 ⁻³	37,8	22,2
					95·10 ⁻³	76,0	87.10-3	69,6	8,4
800					98·10 ⁻³	78,4	89.10-3	71,2	9,1
					$103 \cdot 10^{-3}$	82,4	92·10 ⁻³	73,6	10,6

Установлено, що розбіжність розрахунку та експериментальних даних не перевищує 10 %.

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено:

– креслення акустикофоретичного масловіддільника систем суфлювання ГТД 4-го покоління ДН 80 і ДГ 90;

– робочі зразки обладнання.



Рисунок 5.34 – Сепаратор з ультразвуковим модулем для *G* = 400...800 м³/год на основі багаторівневих градієнтних сепараційних технологій: *а)* фото генератора пульсацій; *б)* електричний модуль пульсатора;

в) тривимірна модель сепаратора; г) фото сепаратора

5.8 Упровадження результатів роботи

На рис. 5.35 наведено приклади застосування розробленого сепараційного обладнання.



Газотурбінний двигун ДГ 90



Газотурбінний двигун ДН 80











Циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор газу енергетичних установок







Плоский неізотермічний градієнтний сепаратор газу енергетичних установок







Сепаратор стиснутих газів енергосистем







Сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння







Рисунок 5.35 – Приклади застосування розробленого сепараційного обладнання

5.8.1 Акти впровадження роботи

 Отримано акт упровадження результатів роботи у ДП НВКГ «Зоря»– «Машпроект» (Україна) згідно з господарським договором № 2077 від 01.06.2012/1875 на «Розробку сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор стиснутих газів енергосистем** SP-800 (*G* = 400...800 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

2. Отримано акт упровадження результатів роботи у ПАТ «Завод «Екватор» відповідно до договору про співпрацю.

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи:

-	SPW 6,3	(<i>G</i> = 6301600 м ³ /год);
---	---------	--------------------------------------------

- SPW 10,0 $(G = 1000...2500 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 16,0 $(G = 1600...4000 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 25,0 $(G = 2500...6300 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 40,0 $(G = 4000...10000 \text{ м}^3/год);$
- SPW 63,0 $(G = 6300...16000 \text{ м}^3/\text{год})$

та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

3. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Batumi Navigation Teaching University LTD» (Грузія) на «Розробку суднового сепаратора для очистки повітря у машинному відділенні».

Згідно з актом упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SP-100 (*G* = 10...140 м³/год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

4. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Georgian Veritas LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор стиснутих газів енергосистем** SP-100 (*G* = 50...100 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

5. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Marine technical service LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор стиснутих газів енергосистем** SP-200 (*G* = 100...200 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

6. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Sea service LTD» (Грузія) на «Розробку сепаратора для очистки стиснутого повітря від рідких та твердих частинок для суднового обладнання з високим тиском».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор стиснутих газів енергосистем** SP-400 (G = 200...400 м³/годину) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

7. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ДП ПКБ Чорноморсуднопроект» (Україна) на «Розробку систем очищення повітря від краплинної вологи для технічного кондиціонування приміщень машинного відділення».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPW 6,3 ($G = 630...1600 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

8. Отримано акт упровадження результатів роботи у «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) відповідно до контракту № 03.2013/03 на «Розробку системи контролю та розділення різнорідних рідких речовин (вода, масло та ін.)».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPWS 63,0 (*G* = 6300...16000 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

9. Отримано акт упровадження результатів роботи у «China–Ukraine (Jiangsu) Transnational Transfer Center of Shipbuilding and Marine Engineering» (Китай) відповідно до контракту № 11/2014/1 на «Розробку водневої технології для системи очистки та розділення для водневого блока».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння** SP-10 (*G* = 0,1...10 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

10. Отримано акт упровадження результатів роботи у «QUZHOU AISHANG INDUSTRIAL DESIGN CO LTD» (Китай) згідно з технічною угодою на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено **сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння** SP-10 (*G* = 0,1...10 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

11. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ZHEJIANG ACME INFO TECHNOLOGY CO LTD» (Китай) відповідно до технічної угоди на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем:

- SP-100 (*G* = 50...100 м³/год);
- SP-200 (*G* = 100...200 м³/год);
- SP-400 (*G* = 200...400 м³/год);
- SP-800 (*G* = 400...800 м³/год)

та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

12. Отримано акт упровадження результатів роботи у «SHENGZHOU ALENT ENTERPRISE MANAGMENT CONSULTING CO LTD» (Китай) відповідно до технічної угоди на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено плоский неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-500 (*G* = 190...500 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

13. Отримано акт упровадження результатів роботи у «ZHEJIANG YUNDYNAMIC INVESTMENT MANAGMENT CO LTD» (Китай) відповідно до технічної угоди на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 (*G* = 10...140 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

14. Отримано акт упровадження результатів роботи у «QUZHOU MEICHUANG INSTRUMENT CO LTD» (Китай) відповідно до технічної угоди на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи:

- SPW 6,3 (*G* = 630...1600 м³/год);
- SPW 10,0 (*G* = 1000...2500 м³/год);
- SPW 16,0 (*G* = 1600...4000 м³/год);
- SPW 25,0 (*G* = 2500...6300 м³/год);
- SPW 40,0 (*G* = 4000...10000 м³/год);
- SPW 63,0 $(G = 6300...16000 \text{ м}^3/\text{год});$
- SPW 100,0 (*G* = 10000...16000 м³/год);
- SPW 1160 (*G* = 16000...25000 м³/год);
- SPW 1250,0 (*G* = 25000...40000 м³/год);
- SPW 1400,0 (*G* = 30000...40000 м³/год);
- SPWS 16,0 (*G* = 1600...4000 м³/год);
- SPWS 25,0 (*G* = 2500...6300 м³/год);
- SPWS 40,0 (*G* = 4000...10000 м³/год);
- SPWS 63,0 (*G* = 6300...16000 м³/год)

та застосовано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

15. Отримано акт упровадження результатів роботи у «2SHENGZHOU SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATION SERVICE CENTER» (Китай) відповідно до технічної угоди на тему: «Сепараційні градієнтні аерозольні технології в енергетичних установках».

Згідно з актом упроваджено акустикофоретичний сепаратор для ГТД:

- SPA- 200 (*G* = 100...200 м³/год);
- SPA- 400 (*G* = 400...800 м³/год)

та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

• рівень № 4 (GAFS) – технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації.

16. Отримано акт упровадження результатів роботи у «Jiangsu University of Science and Techology» (Китай) відповідно до контракту № 04.2016/01 на «Розробку системи вимірювань для дослідження турбулентної полідисперсної фази для аналізу технологій уловлювання у сепараційному обладнанні».

Згідно з актом упроваджено **технології вимірювання параметрів середовища** та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

5.8.2 Перелік науково-дослідних робіт за темою дисертації

 1. НДР № 2088 № держ. реєстрації 0117U000350 – «Розробка аерозольних градієнтних технологій для систем життєзабезпечення суден і кораблів».
 Замовник – МОН України.

Упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-400 ($G = 200...400 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

НДР № 1667 № держ. реєстрації 0109U002930 – «Розробка та виготовлення високоефективного малогабаритного масловідділювача».
 Замовник – ХІСКТ, Китай.

Упроваджено акустикофоретичний сепаратор для ГТД SPA-400 (G = 400...800 м³/год) та застосовано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепараці;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

• рівень № 4 (GAFS) – технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації.

3. НДР № 1894 № держ. реєстрації 0113U000241 – «Основи турбоімпактної інтенсифікаці процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищенного тиску для енергетичних установок». Замовник – МОН України.

Упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-800 ($G = 400...800 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

3. НДР № 1992 № держ. реєстрації 0115U000303 – «Розробка екологічно безпечної технології та створення експериментальної автоматизованої установки безперервного піролізу цілих зношених автошин з одержанням альтернативних палив». Замовник – МОН України.

Упроваджено плоский неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-500 (G = 190...500 м³/год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

4. НДР № 1918 – «Розробка суднової мультифункціональної системи віддаленого контролю рівня і вимірювання рідини з підсистемою оповіщення»
 – Nantong Haishi Ship Machinery Co., Ltd.

Упроваджено систему очищення повітря від краплинної вологи SPWS 63,0 ($G = 6300...16000 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

5. НДР № 1842 № держ. реєстрації 0111U009084 – «Розробка екологічно безпечної технології екопіролізу для утилізації органічних відходів та

низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального». Замовник – МОН України.

Упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 ($G = 10...140 \text{ м}^3$ /год) та застосовано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

• рівень № 3 (GTFS) – технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

1. НДР № 1875 – «Розробка сепаратора для первинної очистки

паливних газів від твердої та рідкої фракцій».

Замовник – ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект».

Упроваджено сепаратор стиснутих газів енергосистем SP-800 ($G = 400...800 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

7. НДР № 1810 № держ. реєстрації 0111U002310 – «Наукові основи енергозберігаючого двостадійного процесу термічної утилізації органічної частини твердих побутових відходів». Замовник МОН України.

Упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 ($G = 10...140 \text{ м}^3$ /год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

8. НДР № 1764 № держ. реєстрації 0110U001322 – «Основи інтенсифікації ультратурбофоретичного переносу високодисперсної фази при розділенні двофазних середовищ». Замовник – МОН України.

Упроваджено акустикофоретичний сепаратор для ГТД:

- SPA-200 (*G* = 100...200 м³/год);
- SPA-400 (*G* = 400...800 м³/год)

та використано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;

• рівень № 4 (GAFS) – технологія градієнтної акустикофоретичної сепарації.

9. НДР № 1744 № держ. реєстрації 0109U007601 – «Розроблення новітньої технології переробки органічних відходів методом багатоконтурного піролізу з отримуванням альтернативного палива». Замовник – МОН України.

Упроваджено плоский неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-500 ($G = 190...500 \text{ м}^3$ /год) та застосовано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

10. НДР № 1623, № держ. реєстрації 0107U000711 – «Енергозбереження на основі інтенсифікації струминної утилізації та очищення газових викидів енергетичних установок». Замовник – МОН України.

Згідно з актом упроваджено **сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння** SP-10 (*G* = 0,1...10 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

11. НДР № 1666 № держ. реєстрації 0109U002928 – «Розробка стенда для досліджень масловіддільників». Замовник – ХІСКТ, Китай.

Згідно з актом упроваджено технології вимірювання параметрів середовища та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

319

12. НДР КОНТРАКТ № 11.2014/01 «Разработка солнечно-водородной металлогидридной установки". Замовник – Jiangsu University of Science and Technology.

Згідно з актом упроваджено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння SP-10 (G = 0,1...10 м³/год) та застосовано наступні технології:

• рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;

• рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації.

13. НДР КОНТРАКТ № 11. 04/2016/1. Форматування та підготовка змісту книги «Теплотехнічні вимірюваня та прилади в суднових енергетичних установках». Замовник – Jiangsu University of Science and Technology.

Згідно з актом упроваджено технології вимірювання параметрів середовища та дослідження сепараторів на дослідному обладнанні у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу.

14. НДР № 1699, № держ. реєстрації 0103U001794 – «Дослідження та інтенсифація процесів турбонеізотермічного градієнтного перенесення дисперсної фази при очищенні і розділенні робочих двофазних середовищ». Замовник – МОН України.

Упроваджено циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор SPT-140 (*G* = 10...140 м³/год) та використано наступні технології:

- рівень № 1 (INS) технологія інерційної сепарації;
- рівень № 2 (GTUS) технологія градієнтної турбофоретичної сепарації;
- рівень № 3 (GTFS) технологія градієнтної неізотермічної сепарації.

№ 3/П	Назва	Тип	Публікація	Співатор
2	Установка для дослідження динамічних і теплофізичних характеристик газодинамічних об'єктів Стенд для дослідження газодинаміки та теплопереносу турбулентних газових середовищ методом голографічної інтерферометрії	Патент	Патент України на корисну модель № 64322; опубл. 10.11.11 р. Бюл. № 21 Патент України на корисну модель № 68673; опубл. 10.04.12 р. Бюл. № 7	
3	Пристрій для відокремлення рідини від газу	Патент	Патент України на корисну модель № 102840; опубл. 25.11.15 р. Бюл. № 22	Рижков Р. С.
4	Пристрій для відокремлення рідини від газу	Патент	Патент України на винахід № 114207; опубл. 10.05.17 р. Бюл. № 9	Рижков Р. С.
5	Спосіб утилізації вологи з газопарової суміші та пристрій його реалізації	Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09269 від 05.09.2016	Кузнецов С. А., Борцов О. С., Шевцов А. П.
6	Ступінчатий охолоджувач повітря	Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09429 від 12.09.2016	Радченко А. М., Радченко Р. М., Кантор С. А., Радченко М. I.

5.8.3 Заявки та патенти за темою роботи

7 8	Спосіб охолодження газопарової суміші Конденсаційний сепаратор газопарорідинної суміші	Заявка на ПАТЕНТ Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09459 від 12.09.2016 № а 2016.09460 від 12.09.2016	Радченко А. М., Радченко Р. М., Радченко М. І.
9	Спосіб інтенсифікації градієнтної сепарації газопарорідинної суміші конденсацією	Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09460 від 12.09.2016	
10	Апарат поверхневого охолодження повітря	Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09443 від 12.09.2016	Радченко Р. М., Радченко М. І., Радченко А. М.
11	Спосіб ступінчастого охолодження повітря	Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09446 від 12.09.2016	Радченко А. М., Радченко Р. М., Радченко М. I.
12	Спосіб охолодження повітря на ребристих поверхнях	Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09463 від 12.09.2016	Радченко А. М., Радченко Р. М., Радченко М. І. Кантор С. А.
13	Система ступінчастого охолодження повітря	Заявка на ПАТЕНТ	№ а 2016.09430 від 12.09.2016	Радченко А. М., Радченко Р. М., Радченко М. І. Кантор С. А.

5.8.4 Технічні характеристики розроблених сепараторів

Технічні характеристики розроблених сепараторів наведені у табл. 5.16– 5.21.

Таблиця 5.16 – Характеристики сепаратора картерних газів двигунів внутрішнього згоряння (**SP-10**)

Назва	Сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього							
	згоряння SP-10							
Якість	3-й клас чистоти за ISO 8573-1							
Переваги	Використання багаторівневих градієнтних сепараційних							
	технологій дозволяє збільшити до 25 % очищення							
	високодисперсного аерозолю							
Технології	Рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;							
	рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної							
	турбофоретичної сепарації							
Витрати газу	0,110 м ³ /год							
Перепад тиску	Ее більше 0,23,5 кПа							
Ефективність	Сумарна – більше 99,9 %.							
очистки	Фракційна:							
	• від крапель більше 10 мкм – на 100 %;							
	• від крапель більше 5 мкм – на 96 %;							
	 від крапель 3 мкм – до 97 %; 							
	• від крапель більше 1 мкм – до 91 %							
Відмінності	Модернізація конструкції							
від	1. Змінено геометрію сепаруючого канала.							
попередньої	2. Змінено кількість та типи сепараційних сіток з							
моделі	урахуванням здійснених розрахунків, що дозволить							
	зменшити витрати на виготовлення							

Таблиця 5.17 – Характеристики сепараторів стиснутих газів енергосистем

Назва	Сепаратор стиснутих газів енергосистем						
Якість	3-й клас ч	истоти за ISO 8573-	1				
Переваги	Використа	ння багаторівневих	с градієнтних се	параційних			
1	технологій	і а дозволяє збільшит	ти до 30 % очищ	ення			
	високодис	персного аерозолю					
Технології	Рівень №	<u>1 (INS)</u> – технологі	я інерційної сеп	арації:			
	рівень №	2 (GTUS) – техноло	огія гралієнтної	турбофоретичної			
	сепарації	_ (,	<u>F</u> G	- , r			
Умовне позначення	Об'ємна витрата повітря, м ³ /год	Аеродинамічний опір, Па (мм вод. ст.)	Робоче навантаження вологи, г/кг сухого повітря	Роздільна здатність, % (граничне відхилення –1,0)			
SP100	50100	40250					
SP 200	100200	55315	20	99.9			
SP 400	200400	40250		<i>,</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,			
SP 800	400800	40250					
		Сумарне – більше	99,9 %.				
		Фракційне:					
Уловлювання	я краплин	• від крапель	більше 100 мкм	и – на 100 %;			
		• від крапель	ь більше 5 мкм –	на 99 %;			
		• від крапель	ь 3 мкм – до 97 %	⁄o;			
		• від крапель	ь більше 1 мкм –	до 65 %			
		Моде	рнізація констр	укції			
		1. Змінено геометрію модулей та елементів.					
Відмінності в	31Д	2. Змінено кількість та типи сепараційних сіток					
попередньої	моделі	з урахуванням здійснених розрахунків, що					
		дозволить зм	иеншити витрати	и на виготовлення			
Назва Плоский неізотермічний градієнтний сепаратор SPT - 500 Якість 3-й клас чистоти за ISO 8573-1 Використання багаторівневих градієнтних сепараційних Переваги технологій дозволяє збільшити до 25 % очищення високодисперсного аерозолю Рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації; Технології рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретичної сепарації; рівень № 3 (GTFS) – технологія градієнтної неізотермічної сепарції 100...500 м³/год Витрати газу Не більше 0,2...3,5 кПа Перепад тиску Сумарна – більше 99,9 %. Ефективність Фракційна: очистки • від крапель більше 10 мкм – на 100 %; • від крапель більше 5 мкм – на 96 %; • від крапель 3 мкм – до 97 %; • від крапель більше 1 мкм – до 91 % Модернізація конструкції Відмінності Змінено геометрію каналів у сепараторі у вхідному та від 1. попередньої вихідному сепаруючому елементі, що інтенсифікує моделі створення градієнтів температрур. 2. Змінено кількість та типи сепараційних сіток (теплообмінних елементів) з урахуванням розрахунків, що дозволить зменшити витрати на виготовлення. Крім того, використано оптимізований теплообмінний елемент

Таблиця 5.18 – Характеристики плоского неізотермічного сепаратора

Назва	Циліндричний неізотермічний градієнтний сепаратор		
	SPT-140		
Якість	3-й клас чистоти за ISO 8573-1		
Переваги	Використання багаторівневих градієнтних сепараційних		
	технологій дозволяє збільшити до 30 % очищення		
	високодисперсного аерозолю		
Технології	Рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;		
	рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної		
	турбофоретичної сепарації;		
	рівень № 3 (GTFS) – технологія градієнтної неізотермічної		
	сепарації		
Витрати газу	10140 м ³ /год		
Перепад тиску	Не більше 0,23,5 кПа		
Ефективність	Сумарна – більше 99,9 %.		
очистки	Фракційна:		
	• від крапель більше 10 мкм – на 100 %;		
	• від крапель більше 5 мкм – на 96 %;		
	 від крапель 3 мкм – до 97 %; 		
	• від крапель більше 1 мкм – до 91 %		
Відмінності	Модернізація конструкції		
від	1. Змінено геометрію каналів у сепараторі, що дозволить		
попередньої	більш ефективно уловлювати високодисперсні частинки.		
моделі	2. Змінено кількість та типи сепараційних сіток		
	(теплообмінних елементів) з урахуванням здійснених		
	розрахунків, що дозволить зменшити витрати на		
	виготовлення		

Таблиця 5.20 – Характеристики системи очищення повітря від краплинної вологи

Назва	Системи очищення повітря від краплинної вологи				
Якість	3-й клас чистоти за ISO 8573-1				
Переваги	Використання багаторівневих градієнтних сепараційних технологій				
	дозволяє збілы	иити до 30 % очищ	ення високодисп	ерсного	
	аерозолю				
Технології	Рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;				
	рівень № 2 (G	ГUS) – технологія і	градієнтної турбс	форетичної	
	сепарації				
Умовне	Об'ємна		Робона	Роздільна	
	витрата	Аеродинамічний	навантаження вологи, г/кг сухого повітря	здатність, %	
	повітря,	опір, Па		(граничне	
позначення	м ³ /год	(мм вод. ст.)		відхилення –	
				1,0)	
SPW 6,3	6301600	40250			
SPW 10,0	10002500	55315			
SPW 16,0	16004000	40250			
SPW 25,0	25006300	40250			
SPW 40,0	400010000	45315			
SPW 63,0	630016000	40250	20	100	
SPW 100,0	1000016000	60155	20	100	
SPW 1160	1600025000	65150			
SPW 1250,0	2500040000	92235			
SPW 1400,0	3000040000	100160			
SPWS 16,0	16004000	20100			
SPWS 25,0	25006300	25125			
SPWS 40,0	400010000	20100			
SPWS 63,0	630016000	20155			
Ефективність	Сумарна – більше 99,9 %.				
	Фракційна:				
	 від крапель більше 10 мкм – на 100 %; 				
	• від крапель більше 5 мкм – на 96 %;				
	• від крапель 3 мкм – до 97 %;				
	 від крапель більше 1 мкм – до 91 % 				
Відмінності	Модернізація конструкції				
В1Д	1. Змінено геометрію сепаруючого профілю.				
попередньої	2. Розміри зменшено на 20 % від попередніх моделей				
моделі					

Таблиця 5.21 – Характеристики акустикофоретичного сепаратора

Назва	Акустикофоретичний сепаратор для ГТД		
Якість	3-й клас чистоти за ISO 8573-1		
Переваги	Використання багаторівневих градієнтних сепараційних		
	технологій дозволяє збільшити до 30 % очищення		
	високодисперсного аерозолю		
Технології	Рівень № 1 (INS) – технологія інерційної сепарації;		
	рівень № 2 (GTUS) – технологія градієнтної турбофоретицної сецарації:		
	рівень № 4 (GAFS) – технологія градієнтної		
	акустикофоретичної сепарації		
SPA-200	Витрати газу – 100200 м ³ /год		
SPA-800	Витрати газу – 200800 м ³ /год		
Перепад тиску	Не більше 2,53,9 кПа		
Ефективність	Сумарна – більше 99,9 %.		
очистки	Фракційна:		
	 від крапель більше 10 мкм – на 100 %; 		
	• від крапель більше 5 мкм – на 96 %;		
	 від крапель 3 мкм – до 97 %; 		
	• від крапель більше 1 мкм – до 91 %		
Відмінності від	Модернізація конструкції		
попередньої	1. Змінено геометрію сопел у сепараторі у вхідному та		
моделі	вихідному сепаруючому елементі, що дозволить більш		
	ефективно уловлювати грубодисперсні частинки.		
	2. Эменшено розміри сепаруючого профілю до 80 мм та		
	лозволить зменшити габарити сепаратора.		
	3. Змінено кількість та типи сепараційних сіток з		
	урахуванням здійснених розрахунків, що дозволить		
	зменшити витрати на виготовлення.		
	4. Додано ультразвуковий пульсаційний елемент, що		
	дозволить більш ефективно улювлювати		
	високодисперсні асрозолі		

Основні результати і висновки по розділу 5

1. Розроблено конструктивні схеми та рекомендації з побудови пристроїв очищення дисперсних середовищ для екологічних та енергетичних установок з використанням багаторівневих технологій, які враховують: технології інерційної сепарації; технології градієнтної турбофоретичної сепарації; технології градієнтної неізотермічного сепарації; технології градієнтної акустикофоретичної сепарації.

2. Розроблено конструктивну схему та рекомендацію з побудови сепараторів для пневмосистем і картерних газів двигунів внутрішнього згоряння, які складаються з технологій інерційної сепарації та градієнтної турбофоретичної сепарації. Запропоновані конструкції охоплюють інтервал витрат стиснутого повітря 1...800 м³/год і забезпечують очистку за 3-м класом чистоти.

3. Розроблено конструктивну схему та рекомендацію з побудови односекційного неізотермічного сепаратора для енергетичних установок, яка містить технології інерційної сепарації; градієнтної турбофоретичної сепарації; градієнтної неізотермічного сепарації. Газоочисник з неізотермічним кільцевим коагулятором доцільно використовувати для очищення гарячих газів при тиску до 10 МПа з концентрацією крапель до 100 г/м³. Раціональні об'ємні витрати через нього 1,0...200,0 м³/год.

4. Розроблені конструктивна схема та рекомендація з побудови багатосекційного неізотермічного сепаратора для енергетичних установок, яка складається з технології інерційної сепарації; технології градієнтної турбофоретичної сепарації; технології градієнтної неізотермічної сепарації. Раціональні об'ємні витрати через нього 1,0...100,0 м³/год.

5. Розроблена конструктивна схема та рекомендація з побудови багатоступінчатих плоских акустикофоретичних сепараторів для газотурбінних двигунів, що включає в себе технології інерційної сепарації, градієнтної турбофоретичної сепарації, градієнтної акустикофоретичної сепарації.

6. Розроблені конструктивна схема та рекомендація з побудови акустикофоретичного модуля сепаратора для енергетичних установок, яка складається з технологій інерційної сепарації, градієнтної турбофоретичної сепарації, градієнтної акустикофоретичної сепарації.

7. За допомогою 3D-моделювання розроблено сепаратор картерних газів двигунів внутрішнього згоряння для діапазону витрат 2...10 м³/год. Установлено, що перепад тиску в сепаруючих коагуляторах досягає 0,2...3,5 кПа відповідно, а коефіцієнт уловлювання частинок досягає 99 %. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено креслення для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи та робочі зразки обладнання.

8. За допомогою 3D-моделювання досліджено сепаратори стиснутих газів енергосистем для витрат 50...2000 м³/год при тиску 0,6...6,0 МПа, а коефіцієнт уловлювання частинок досягає 99 %. 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.

9. За допомогою 3D-моделювання досліджено плоский неізотермічний градієнтний сепаратор газу для діапазону витрат $G = 100...500 \text{ м}^3$ /год. Перепад температур уздовж циліндричного каналу 30...250 °C дозволяє підвищити ефективність осадження за рахунок неізотермічної градієнтної технології від 14 до 20 %. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено: креслення для модельного ряду плоских неізотермічних градієнтних сепараторів газу; стандарт підприємства для модельного ряду суднових систем очищення повітря від краплинної вологи; робочі зразки обладнання.

ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. 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.

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

3. Обгрунтовано 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, а також 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 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 із 50 до 80 % за рахунок інтенсифікації процесів сепарації шляхом використання різних рівнів технологій: інерційної, турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної;

– 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 відведенням під дією сили тяжіння по поверхнях за межі каналів;

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

5. За показниками (ефективність та інтенсивність очистки) розроблено наступні рівні градієнтних аерозольних технологій:

– 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 примежових шарів, поверхонь у відривних зонах;

 другий – турбофоретичної, що застосовується у багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляційних гофрованих сітках), відривних зонах у примежових 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 та аерозольним середовищем, між аерозольним середовищем та стінками, на охолоджуваних багатофункціональних поверхнях осадження (коагуляторах з гофрованих сіток);

 четвертий – акустикофоретичної, що застосовується у вхідних та 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 сепарацій, а саме: інерційної і градієнтної турбофоретичної; інерційної і градієнтної неізотермічної; інерційної, градієнтних неізотермічної і турбофоретичної; інерційної, градієнтних турбота акустикофоретичної; інерційної, градієнтних неізотермічної, турбо- та 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 аерозолю, 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, 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 та 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 ефективне 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 2,0*d* 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 48,07 до 67,95 %.

12. Досліджено вплив неізотермічного градієнтного ефекту на концентрацію дисперсної фази при проходженні коагулятора з ультразвуковою інтенсифікацією та швидкості 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 із 50,23 до 84,60 %. 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 аерозолю 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 дозволив скоротити час упровадження результатів розробок, принципова новизна яких підтверджена патентами та заявками на винаходи, а також здійснити оцінку економічного ефекту від упровадження зразків нової сепараційної техніки: пневмосистем і систем картерних газів ДВЗ, одно- та багатосекційних неізотермічних сепараторів газопаротурбінних установок, акустикофоретичних сепараторів і масловіддільників систем суфлювання ГТД, стиснутих газів енергосистем, суднових систем очищення повітря від краплинної вологи, які використовують технології інерційної і градієнтних турбофоретичної, неізотермічної та акустикофоретичної сепарацій.

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

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

 Абрамович Г.Н. Турбулентное смешение газовых струй [Текст] / Абрамович Г.Н., Драшенников С.Ю., Секундов А.Н. // М.: Наука, 1974. – 272 с.

Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй [Текст] / Абрамович Г.Н.
 // М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.

Артемов Г.А. Совершенствование судовых газотурбинных установок
 [Текст] / Артемов Г.А. // Л.: Судостроение, 1984. – 140 с.

 Артемов Г.А. Судовые установки с газотурбинными двигателями
 [Текст] / Артемов Г.А., Горбов В.М., Романовский Г.Ф. // Николаев: УГМТУ, 1997. – 234 с.

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

6. Басок Б.И. Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале [Текст] / Басок Б.И., Рыжков С.С., Авраменко А.А. // Промышленная теплотехника. Международный научно –прикладной журнал. – Киев. - Т. 28. - № 3, 2006. – С.14-19.

7. Басок Б.И. Групповые методы в теплофизике [Текст] / Басок Б.И. Авраменко А.А. Кузнецов А.В. // Наукова думка: Киев, 2003.

8. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. [Текст] / В.В. Белоусов // М.: Металлургия, 1988. – 256 с.

9. Билык Б.И. Исследование маслоотделителя для ГТД ДП 73 / Билык Б.И., Рыжков С.С., Рыжков С.С. (ст.) [Текст] // Тезисы докладов 4-й Международной научно-технической конференция «Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении». – Николаев, 2005. – С. 287-288.

10. Бич М.М. Смазка авиационных газотурбинных двигателей – / Бич

М.М., Вейнберг Е.В., Сурнов Д.И. // М.: Машиностроение, 1979. – 147 с.

11. Богатых С.А. Циклонно-пенные аппараты [Текст] / Богатых С.А. // Л.:Машиностроение, 1978. – 244 с.

12. Бруяцкий Е.В. Турбулентные стратифицированные струйные течения [Текст] / Бруяцкий Е.В. // К.: Наукова думка, 1986. – 296 с.

13. Булыгин П.А. Газотурбинные установки судов на подводных крыльях
 [Текст] / Булыгин П.А. // Л.: Судостроение, 1971. – 192 с.

14. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами [Текст] / Бусройд Р. // М.: Мир, 1975. – 384 с.

15. Баженов Г.В. Судовая газотурбинная установка М-25 [Текст] / Г.В. Баженов, В.И. Романов, В.Т. Лисов // Морской флот, 1976. – № 9. – С.43-46.

16. Венедиктов В,Д. Турбины и реактивные сопла на двухфазных потоках [Текст] / Венедиктов В,Д. // М.: Машиностроение, 1969."

17. Венцель В.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / Венцель В.В. // М.: Химия, 1979. – 320 с.

18. Волошин В.П. Охрана морской среды [Текст] / Волошин В.П. // Л.:Судостроение, 1987. – 208 с.

19. Герц Е.В. Пневматические устройства и системы в машиностроении: справочник [Текст] / Е.В. Герц. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.

20. Голиков В.А. Повышение эффективности и оптимизация режимов работы судового микроклимата: Авторефер. Дис. Д-ра техн.наук: 05.08.05 / Голиков В.А. // Укр.госуд.морск.техн. ун-т.- Николаев, 2000. – 36 с.

21. Гордон Г.М. Пылеулавливание и очистка газов [Текст] / Гордон Г.М., Пейсахов И.Д. // М.:Металлургия, 1968. – 499 с.

22. Грин Х. Аэрозоли- пыли, дымы и туманы [Текст] / Грин Х., Лейн В. // Л.: Химия, 1969. – 427 с.

23. Гусева Е.И. Осаждение частиц на стенках канала в турбулентном двухфазном потоке под действием различных внешних факторов [Текст] / Гусева Е.И., Зайчик Л.И. // Тез. Докл. 3-й Всесоюз. школы-семинара «Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена».– М.: МГТУ, 1991.

24. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред [Текст] / Дейч М.Е. // М.: Энергия, 1968.

25. Долидович А.Ф. Муниципальные технлогии газоочистки, предотвращающие загрязнение окружающей среды теплом и CO₂ [Текст] / Долидович А.Ф. // Промышленная теплотехника: Международный научно – прикладной журнал. – Том 25 (приложение к журналу) №4, Киев, 2003. – С. 31-33.

26. Долинский А.А. Разработка термофоретического каплеуловителя для испарительно-сушильных агрегатов [Текст] / А.А. Долинский, С.С. Рыжков, А.П. Гартви // Промышленная теплотехника. – 2006. –Т. 28. – № 6. – С.49-55.

27. Дыбан Е.П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел [Текст] / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур // К.: Наук.думка, 1982. – 303 с.

28. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины [Текст] / Ю.В. Захаров // С-П.: Судостроение, 1990. – 684 с.

29. Иевлев В.М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред [Текст] / В.М. Иевлев // М.: Наука, 1975. – 256 с.

30. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации [Текст] / В.П. Исаченко // М.: Энергия, 1977. – 240 с.

31. Исследование и интенсификация процессов турботермофоретического переноса дисперсной фазы при очистке и разделении рабочих двухфазных сред // Отчет о НИР. – № гос. Регистрации 0103U001794, Том 1 (Рыжков С.С. – Раздел 2). – УГМТУ, Николаев, 2003. – 96 с.

32. Исследование и интенсификация процессов турботермофоретического переноса дисперсной фазы при очистке и разделении рабочих двухфазных сред // Отчет о НИР. – № гос. Регистрации 0103U001794, Тщм 2 (Рыжков С.С. – Разделы 1.2, 1.3). – НУК, Николаев, 2004. – 102 с.

33. Исследование и интенсификация процессов турботермофоретического переноса дисперсной фазы при очистке и разделении рабочих двухфазных сред // Отчет о НИР. – № гос. Регистрации 0103U001794, Том 3 (Рыжков С.С. – Разделы 2,3,4). – НУК, Николаев, 2005. – 61 с.

34. Калверта С. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справочник. Ч. 1 [Текст] / С. И Калверта, Г.М. Инглунда // М.: Металлургия, 1988. – 760 с.

35. Калверта С. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справочник. Ч. 2 [Текст] / С. И Калверта, Г.М. Инглунда // М.: Металлургия, 1988. – 770 с.

36. Калинин Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Яхро // М.: Машиностроение, 1972. – 220 с.

37. Камаи Н. Исследование удара двумерной струи с учетом начальных возмущений [Текст] / Н. Камаи, Х. Танака // Нихон кикай гаккай рамбунсю, 1977. – Т.43. – С.2. – № 372. – С. 2957-2969 (рус.пер. М.:ВЦП, 1978, № А-71920). – С.1-31.

38. Каплеулавливающее устройство / А.с.349258 СССР, МКИ ВО1D./ Рыжков С.В. (СССР). – №1303247; Заявл.17.01.69; Опубл.18.05.72, Б.И. № 45. – 5 с.

39. Кириллов И.И. Основы теории влажно-паровых турбин [Текст] / И.И. Кириллов, В.М. Яблоник // Л.: Машиностроение, 1968.

40. Конвенция МАРПОЛ 73/78. – ИМО, 1980.

41. Коузов П.А. Очистка от пыли и газов воздуха в химической промышленности [Текст] / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрябин // Л.: Химия, 1982. – 256 с.

42. Кэйс В.М. Конвективный тепло- и массообмен [Текст] / В.М. Кэйс //М.: Энергия, 1972. – 442 с.

43. Лебедь Н.Г. Гидродинамика и тепломассо-перенос в компактных судовых аппаратах [Текст] / Н.Г. Лебедь, В.М. Боград // Л.: Судостроение, 1985. – 134 с.

44. Левин Л.И. Исследование по физике грубодисперсных аэрозолей [Текст] / Л.И Левин // М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 243 с.

45. Леонтьев А.И. Перенос частиц аэрозоля в неизотермическом

турбулентном потоке [Текст] / А.И. Леонтьев, Э.А. Цалко // Теплофизика высоких температур, 1969. – Т. 7, № 4. – С. 715–722.

46. Лисов В.Т. ГТД судна «Капитан Смирнов» [Текст] / В.Т. Лисов // Судостроение. –1980. – № 3. – С. 30–32.

47. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. [Текст] / Л.Г. Лойцянский // М.: Наука, 1987. – 840 с.

48. Лукин В.Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности [Текст] / В.Д. Лукин, М.И. Курочкина // Л.: Химия, 1980. – 232 с.

49. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник [Текст] / А.В. Лыков // М.: Энергия, 1972. – 560 с.

50. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е.П. Медников // М.: Наука, 1981. – 176 с.

51. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений [Текст] // М.: Экономика, 1977.– 47 с.

52. Методика определения экономической эффективности создания и использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в судостроительной промышленности [Текст] // Л.: ЦНИИ ТС, 1979.

53. Михайлов Е.И. Комплексные воздухоочистительные устройства для энергетических установок [Текст] / Е.И. Михайлов и др. // Л.: Машиностроение, 1978.

54. Мокшин В.Н. Борьба со взрывами в картерах двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.Н. Мокшин, А.В. Клеменьтьев // Судостроение. –1960.– № 3. – С. 35-40.

55. Мягков Б.И. Очистка воздуха от масляного тумана на металлообрабатывающих предприятиях [Текст] / Б.Т. Мягков, О.А. Попов // М.: ЦНИИХИМНЕФТЕМАШ, 1981. – 40 с.

56. Николаевские газотурбинные двигатели и установки. История создания [Текст] / Под редакцией В.И. Романова // Николаев: «Юг-Информ», 2005. – 304 с.

57. Орлов В.В. О поперечном движении твердых частиц в поток с пульсирующим сдвигом [Текст] / В.В. Орлов // Инж.–физ. журнал, 1970. – Т.19, № 2. – С. 341–344.

58. Основи турбоімпактної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищенного тиску енергетичних установок: звіт з НДР. – № держ. реєстрації 0113U000241 : Тема №1894 / Кер. роботи С.С. Рижков. – Миколаїв, 2013.

59. ОСТ 5.5149-74. Отраслевой стандарт. Системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Отделители воды. – М. – 1974. – 7 с.

60. Петренчук О.П. Экспериментальное исследование атмосферного аэрозоля [Текст] / О.П. Петренчук // Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 264 с.

61. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А.И. Пирумов // М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.

62. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечнооребренных труб [Текст] / Е.Н. Письменный // Альтерпес., Киев, 2004.

63. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно – оребренных поверхностей нагрева / Письменный Е.Н. // Альтерпес. – Киев, 2003.

64. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию [Текст] / П. Райст // М.: Мир, 1987. – 330 с.

65. Розробка сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій : звіт з НДР. – № держ. реєстрації 0111U009084 : Тема №1875 / Кер. роботи С.С. Рижков. – Миколаїв, 2012.

66. Романовський Г.Ф. Будова, правила технічної експлуатації та обслуговування газотурбінних двигунів [Текст] / Г.Ф. Романовський, Ю.О. Султанський, В.І. Харченко. – Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. – 156 с.

67. Романовский Г.Ф. Плазмохимические системы судовой энергетики [Текст] / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин // Николаев: УГМТУ, 1998. – 248 с.

68. Романовський Г.Ф. Сучасні газотурбінні агрегати. Том 1. Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г.Ф. Романовський, С.І. Сербін, В.М. Потлайчук // Миколаїв: НУК, 2005. – 356 с.

69. Романовський Г.Ф. Теорія та розрахунок парових та газових турбін [Текст] / Г.Ф. Романовський, О.Я. Іпатенко, В.М. Потлайчук // Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 292 с.

70. Роуч П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч // Пер. с англ. – М.:Мир, 1980. – 660 с.

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

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

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

74. Рыжков С.В. Теплотехнические измерения в судовых энергетических установках [Текст] / С.В. Рыжков // Л.: Судостроение, 1980. – 264 с.

75. Рыжков С.В. Повышение эффективности сепарирующего устройства с помощью сотового коагулятора [Текст] / С.В. Рыжков, О.М. Хмара // Л.: Вопросы судостроения. – 1979. – № 16.

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

77. 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 міжнародна науково-технічної конференції.– Миколаїв, 2013. – С. 375-377.

78. Рижков С.С. Дослідження газодинаміки 3D-моделі турбоімпактного сепаратора з радіальним коагуляційним елементом палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С.129-131.

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

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

81. 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 міжнародної науковотехнічної конференції. – Миколаїв, 2014. –С.92-93.

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

83. Рыжков С.С. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред [Текст] /

С.С. Рыжков, Б.И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23 (4–5). – С. 141-145.

84. Рижков С.С. Забезпечення високого рівня екологічної безпеки при будівництві та експлуатації суден за рахунок впровадження аерозольних технологій [Елекронний ресурс] / С.С. Рижков // Вісник НУК. – 2010. – Режим доступу : http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24561.

85. Рыжков С.С. (ст.) Интенсификация инерционно-турбофоретического улавливания высокодсперсных аэрозолей в коагуляторах газоочистных устройств [Текст] / С.С. Рыжков (ст.), Б.И. Билык // Зб. Наук. Праць УДМТУ. Миколаїв: УДМТУ. – 2002. – № 8(386). – С. 66-76.

86. Рыжков С.С. Исследование зон турбофоретического осаждения частиц в пограничном слое пластины обтекаемой струей [Текст] / С.С. Рыжков, Б.И. Билык // Зб. Наук. Праць УДМТУ. –Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 7(385). – С. 100-110.

87. Рыжков С.С. (ст.) Проблемы очистки воздуха машинных отделений судов с ядерными энергетическими установками [Текст] / С.С. Рыжков (ст.), Б.И. Билык // Матеріали Міжнародної конференції "Кораблебудування: освіта, наука, виробництво". – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – С.162-164.

88. Рыжков С.С. Расчет влияния перепада температур на осаждение высокодисперсных частиц на основе транспортного уравнения Рейнольдса [Текст] // Тези доповідей Міжнародної науково–технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених та молодих спеціалістів «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв, 2005. – С.122-123.

89. Рыжков С.С. Разработка обобщенной математической модели процессов турбофоретического переноса частиц в высокотурбулизированном потоке [Текст] / С.С. Рыжков, С.И. Сербин, Б.И. Билык // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции «Проблемы экологии и энергосбережения в судостроении». – Николаев, 2005. – С. 256-258.

90. Рыжков С.С. Экспериментальные исследования осаждения частиц на пластине с выступами в области пристенной струи [Текст] / С.С. Рыжков,

А.С. Рыжков // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених та молодих спеціалістів «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв, 2005. – С.129-130.

91. Рыжков С.С. Экспериментальные исследования осаждения частиц на пластине с выступами в объеме потока [Текст] / С.С. Рыжков // Тези доповідей Міжнародної науково–технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених та молодих спеціалістів «Суднова енергетика: стан та проблеми», Миколаїв. – 2005. – С.131-132.

92. Рижков С.С. (ст.) Розрахунок викидів шкідливих речовин в атмосферу: Методичні вказівки [Текст] / С.С. Рижков (ст.), Ю.М. Харитонов, В.В. Благодатний // Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 44 с.

93. Руководство по контролю вредных веществ в воздухе рабочей зоны: Справ. Изд. [Текст] / С.И. Муравьева, М.И. Буковский, Е.К. Прхорова и др. – М.: Химия, 1991. – 368 с.

94. Рузавин Г.И. Методология научного исследования [Текст] / Г.И. Рузавин. – М.: ЮНИТ-ДАНА, 1999. – 317 с.

95. Сажин Т.М. Удержание NO_x и SO₂ из дымовых газов в электрических полях» [Текст] / Т.М. Сажин, А.Т. Крэчун, К.Н. Боте // Промышленная теплотехника: Международный научно–прикладной журнал. – Киев.

96. Сербин С.И. Совершенствование газоочистных устройств на основе моделирования газодинамических процессов [Текст] / С.И. Сербин, А.С. Рыжков // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв, 2008. - №5. – С. 72 – 81.

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

98. Создание, внедрение маслоотделителей для ГТД ДГ 90 И ДН 80 с высокой эффективностью и улавливанием паров масла // Отчет о НИР № 1425. – № гос. регистрации 0103U001789. – УГМТУ, (Рыжков С.С. - Разделы 4; 5.2; 5.3). – Николаев, 2003. – 101 с.

99. Створення універсальних транспортних суден та засобів океанотехніки : монографія / С.С. Рижков, В.С. Блінцов, Г.В. Єгоров, Ю.Д. Жуков, В.Ф. Квасницький, К.В. Кошкін, І.В. Крівцун, В.О. Нєкрасов, В.В. Севрюков, Ю.В. Солоніченко. – Глава 8.

100. Страус В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус // М.: Химия, 1981. – 583 с.

101. Судовые и стационарные газотурбинные установки закрытого цикла [Текст] / С.Н. Гаврилов, Г.Г. Жаров, А.А. Канаев, И.З Копп, Ю.В. Смолкин. – Л.: Судостроение, 1971. – 288 с.

102. Троицкий Б.Л. Основы проектирования судовых энергетических установок [Текст] / Б.Л. Троицкий, Е.А. Сударева // Л.: Судостроение, 1980. – 133 с.

103. Христич В.А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды [Текст] / В.А. Христич, А.Г. Тумановский // К.. Техника, 1983. – 144 с.

104. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг // М.: Наука, 1969. – 744 с.

105. Шрабер А.А. Турбулентные течения газовзвеси [Текст] / А.А. Шрабер и др. // К.: Наукова думка, 1987. – 240 с.

106. Annex VI of MARPOL 73/78. Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships and NO_x Technical Code // IMO, London, UK MPG Books Ltd. 1998. – 150 p.

107. ANSWER. Version 4.00 // User's Manual. – Analytic & Computational Research, Inc., 2000. – 364 p.

108. Bradbury L. The Structure of a Self –Preserving Turbulent Plane Jet [Text] /L. Bradbury // J. Fluid Mech., 1965. – No. 23. – P. 1-64.

109. Brock J.R.L. On the Theory of Thermal forses acting an Aerozol Particles [Text] / J.R.L. Brock // J. Colloid Sci., 1962. – No. 17. – P. 768-780.

110. Brooks J.M. Report to Air Resources Board on the proposed identification of diesel exhaust as toxic air contaminant. Part A: Expouse assessment [Text] / J.M. Brooks, G.A. Shiroma, D.J. Anies, P.D. Venturini // California EPA,

Office of Environmental Health Hazard Asessment, Air Toxicology and Epidemiology Section, 1998, Jan. –103 p.

111. Caporaloni M. Transfer of Particles in Nonisotropic Air Turbulence
[Text] / M. Caporaloni, F. Tampieri // J. Atmos. Sci., 1975. – No. 32, N3. – P. 565-568.

112. Dennis R. Fabric Filters Model Format Change: Volume II. User's Guide[Text] / R. Dennis, et al. // Report No.PB 297755/AS, April 1979.

113. Diesel engine exhaust // IARC Monographs. – 1989. – Vol. 46. – 560 p.

114. Filtration + Separation// Volume 39. – No. 9, November, 2002 // Elsevier Science UK. – 64 p.

115. Filtration + Separation/ Volume 39. – No. 10, December, 2002 // ElsevierScience UK. – 48 p.

116. Filtration + Separation/Word Buyers' Guide and Directory, 2005 // Elsevier Science UK. – 200 p.

117. Hall D.E. A review of recent literature investigating of the measurement of automotive particulate; the relationship with environment aerosol, air quality and health effect [Text] / D.E. Hall, D.B. King, T.B. Morgan, et al. // Ibid. – 1998. - N_{\odot} 982602. – P. 53-65.

118. Henein N.A. Analysis of Pollutant Formation and Control and Fuel Economy in Diesel Engines [Text] / N.A. // Prog. Energy Combus. Sci.: Pergamon Press, 1976. – Vol. 1. – P. 165-207.

119. International Standard ISO 8573-1 // Air Quality Standards.

120. Ryzhkov S.S. Jet- contact separator of exhaust gases of ship engines [Text] / S.S. Ryzhkov // Proceedings of the third international conference on marine industry, Varna: Bulgaria, 2001. – Vol. 2. – P. 137-145.

121. Ryzhkov S.S. Reduction of losses of oils in ship diesel engines at the expence of increase of efficiency of clearing crank-cases gases [Text] / S.S. Ryzhkov // Proceedings of the third international conference on marine industry. – Varna: Bulgaria, 2001. – Vol. 2. – P. 111-114.

122. Ryzhkov R.S. Experimental Investigations Of Efficiency Of The Turboimpact Breathing Systems Separator For Gas Turbine Installation Of Closed Cycle [Text] / R.S. Ryzhkov, S.I. Serbin // Shipbuilding & Marine Infrastructure. – 2015. – No. 2.

123. Spalding D.B. Matthematical Models of Turbulent Flames: A Review
[Text] / D.B. Spalding // Combustion Science and Technology. – 1976. – Vol.13. –
P. 3-35.

124. Strauss W. Industrial Gas Cleaning [Text] / W. Strauss // Pergamon Press, Oxford, 1975. – 263 p.

125. CFD Modeling Software & Solutions from Fluent / ANSYS, Inc // http://fluent.com.

126. Рыжков С.С. Интенсификация осаждения жидких частиц за счет поперечных пульсаций сеток гофрированного коагулятора [Елекронний ресурс] / Рыжков С.С., Гончарова Н.А. // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2010. – Вип. 1. – Режим доступу: http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24568/22075.

127. Рыжков С.С. Исследование газодинамики сепарационного профиля маслоотделителя [Елекронний ресурс] / Рыжков С.С., Литвинов И.В. // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2010. – Вип. 2. – Режим доступу: http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24847/22333.

128. Рыжков С.С. Численное моделирование осаждения высокодисперсных частиц в проточной части сепарационного оборудования [Елекронний ресурс] / Рыжков С.С., Пастухов С.Ю. // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2010. – Вип. 3. – Режим доступу: http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24952/22404.

129. Рыжков С.С. Исследования газодинамики и теплопереноса турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии [Елекронний ресурс] / Рыжков С.С. // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2010. – Вип. 4. – Режим доступу: http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24976/22437.

130. Рыжков С.С. Исследование влияния ультразвуковых волн на коагуляцию полидисперсных аэрозолей в сепарационном оборудовании [Текст] / Рыжков С.С., Гончарова Н.А. // Збірник наукових праць НУК. – 2011. – Вип. 3. – С.102-108.

131. Рижков С.С. Інтенсифікація осадження високодисперсних частинок у лабіринтному сепараторі за рахунок термофоретичних ефектів [Текст] / Рижков С.С., Ощип О.В. // Збірник наукових праць НУК. – 2011. – Вип. 4. – С.99-107.

 132. Рижков
 С.С. Математичне моделювання газодинаміки

 сепараційного обладнання [Електронний ресурс] / Рижков С.С., Московко О.О.

 //
 Вісник
 НУК

 [Електронне фахове видання України].
 2011.
 Вип. 4.
 Режим доступу:

 http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24015/21548.

133. Рижков С.С. Дослідження температурного поля в елементі сепараційного обладнання методом голографічної інтерферометрії [Елекронний ресурс] / Рижков С.С., Золотий Ю.В., Довгань Д.В. // Вісник НУК [Електронне фахове видання України]. – 2011. – Вип. 5. – Режим доступу: http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24486/21990.

134. Рижков С.С. Результати дослідження впливу підвищення тиску на ефективність турбоімпактних сепараторів багатофазних сумішей палив [Текст] / Рижков С.С., Борцов О.С., Рижков Р.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2013. – Вип. 4. – С.58-61.

135. Рижков С.С. Узагальнена математична модель визначення інтенсивності процесу очистки дисперсних багатофазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / Рижков С.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2014. – Вип. 3. – С.69-76.

136. Рижков С.С. Проблеми інтенсифікації очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок і способи їх вирішення (частина 1) [Текст] / Рижков С.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2014. – Вип. 5. – С.51-58.

137. Рижков С.С. Проблеми інтенсифікації очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок і способи їх вирішення (частина 2) [Текст] / Рижков С.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2014. – Вип. 6. – С.51-57.

138. Рижков С.С. Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / Рижков С.С., Басок Б.І., Рижков Р.С., Борцов О.С. // Промислова теплотехніка. – 2014. – Т. 36. – Вип. 2. – С.22-28.

139. Рыжков С.С. Влияние термофоретических эффектов на процесс улавливания высокодисперсных частиц в трубчатом сепараторе [Текст] / Рыжков С.С. // Промислова теплотехніка. – 2014. – Т. 36. – Вип. 4. – С.88-94.

140. Рыжков С.С. Применение аэрозольных градиентных технологий в сепарационном оборудовании для судостроения и морской инфраструктуры [Текст] / Рыжков С.С. // Shipbuilding and marine infrastructure. – 2015. – Вип. 2(4). – С.151-163.

141. Рижков С.С. Ймовірностна оцінка фракційної ефективності вловлювання аерозолів в прикордонних шарах багатофункціональних поверхонь в енергетичних установках [Текст] / Рижков С.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2016. – Вип. 3. – С.36-44.

142. Рыжков С.С. Осаждение аэрозолей в пограничных слоях плоских поверхностей энергетических установок [Текст] / Рыжков С.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2016. – Вип. 4. – С.53-60.

143. Рижков С.С. Employing the separation gradient aerosol technologies for designing the oil separators oF venting systems in gas turbine engines (G=200 m3/h) [Текст] / Рижков С.С. // Східно-Європейський журнал передових технологій [міжнародний наукометричний науковий журнал]. – 2017. – Вип. 2. – С.59-66.

144. Рижков С.С. Розробка суднових систем очищення повітря від краплинної вологи [Текст] / Рижков С.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2017. – Вип. 1. – Режим доступу: http://jnn.nuos.edu.ua/article/view/102177/97377.

145. Рыжков C.C. Трехмерное моделирование сепарационных градиентных аэрозольных технологий. маслоотделители систем суфлирования гтд с расходом газа до 800 м3/ч [Текст] / Рыжков С.С. // Збірник НУК. 2017. Вип. 2. наукових праць _ Режим доступу: http://jnn.nuos.edu.ua/article/view/107466/102390.

146. Рижков С.С. Розробка сепараторів стиснутого повітря на основі тривимірного моделювання [Текст] / Рыжков С.С. // Збірник наукових праць НУК. – 2017. – Вип.3. – Режим доступу: http://jnn.nuos.edu.ua/article/view/107466/102390.

147. Рыжков С.С. Применение трехмерного моделирования для градиентных аэрозольных технологий сепарации картерных газов ДВС [Текст] / Рыжков С.С. // Shipbuilding and marine infrastructure. – 2017. – Вип. 1(7). – С.151-163.

148. Рыжков С.С. Исследования вариативных схем инерционных сопел для сепарационных градиентных аэрозольных технологий [Текст] / Рыжков С.С. // Суднові енергетичні установки. – 2017. – № 37 – С.94-110.

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

150. Пат. 68673 Україна, МПК G01В 9/02. Стенд для дослідження газодинаміки та теплопереносу турбулентних газових середовищ методом голографічної інтерферометрії / Рижков С.С. (Україна); заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № и 2011 09839; заявл. 08.08.2011; опубл. 10.04.12, Бюл. № 7. – 4 с.

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

152. Пат. 114207 Україна, МПК В01D 45/08, F01M 13/04. Пристрій для відокремлення рідини від газу / Рижков С.С., Рижков Р.С. (Україна); заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № и 2015 02335; заявл. 16.03.2015; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. – 4 с.

153. Рыжков С.С. Экспериментальный стенд для исследования сепарационногооборудования [Текст] / С.С. Рыжков, А.С. Рижков, Р.С. Рыжков // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2008. – С.274-276.

154. 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 Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2008. – С.272-274.

155. Рыжков С.С. Исследование двухфазных сред в пульсационных каналах элементов сепарационного оборудования [Елекронний ресурс] / С.С. Н.А. Гончарова // Проблеми екології та енергозбереження Рыжков, суднобудуванні: Матеріали V Міжнародної науково-технічної В 2010. Режим конференції. Миколаїв, доступу: http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=a73f944f1ebaa24d17 ae808a925c?lectureId=1346&conferenceId=7&isProjectorView=false.

156. Рыжков С.С. Численное моделирование осаждения высокодисперсных жидких частиц в проточной части элемента сепарационного оборудования [Елекронний ресурс] / С.С. Рыжков, С.Ю. Пастухов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2010. – Режим доступу:http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=a73f944f1e baa24d17ae808a925c?lectureId=1345&conferenceId=7&isProjectorView=false.

157. Рыжков С.С. Газодинамические процессы в сепарационном элементе газоочистительного устройства [Текст] / С.С. Рыжков, И.В. Литвинов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2011. – С. 471-473.

158. Рыжков С.С. Исследование газодинамических процессов В сепарационном элементе газоочистного устройства [Елекронний ресурс] / С.С. // И.В.Литвинов Проблеми екології та енергозбереження Рыжков, суднобудуванні: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної В 2011. конференції. Миколаїв, Режим доступу: http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=a73f944f1ebaa24d17 ae808a925c?lectureId=7383&conferenceId=2577&isProjectorView=false.

159. Рыжков С.С. Оценка инновационных научных разработок судовых энергетических установок [Елекронний ресурс] / С.С. Рыжков, А.П. Шевцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2012. – Режим доступу: http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail;jsessionid=54cd217f7b1cb3b263 c6fc06eebb?lectureId=17865&conferenceId=12050&isProjectorView=false.

160. Рыжков С.С. Термофоретические сепараторы воздуха для технических помещений [Текст] / С.С. Рыжков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 377-378.

161. Рижков С.С. Дослідження газодинаміки турбоімпактного сепаратора при очищенні синтез-газу технології екопірогенезіс [Текст] / Рижков С.С., Рижков Р.С., Борцов О.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 372-374.

162. Рижков С.С. Теоретичні дослідження процесів осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску використовуючи сучасні програмні пакети [Текст] / Рижков С.С., Рижков Р.С., Борцов О.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 367-368.

163. Рижков С.С. Розрахунок гідродинамічного стану попереднього ступеня сепаратора підвищеного тиску у межах внутрішньої задачі сучасними програмними пакетами ANSYS [Текст] / Рижков С.С., Рижков Р.С., Борцов О.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 366-367.

164. Рижков С.С. Побудова розрахункових сіток для дослідження газодинамічних турбоімпактних сепараторів на основі програмного пакету ANSYS [Текст] / Рижков С.С., Рижков Р.С., Борцов О.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науковотехнічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 363-364.

165. Рижков С.С. Вдосконалення масловологовіддільників енергосистем стисненого повітря на основі гідродинамічних розрахунків [Текст] / Рижков С.С., Рижков Р.С., Рижков О.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 362-363.

166. Рижков С.С. Термофоретичний сепаратор для очищення синтез газу технології екопірогенезіс [Текст] / Рижков С.С., Рижков Р.С., Борцов О.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 355.

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

168. Рижков С.С. Разработка высокофорсированных гидродинамических методов интенсификации разделения двухфазных сред для экологических и ресурсосберегающих технологий энергетических установок

[Текст] / Рижков С.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали ІV Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 350-352.

169. Рижков С.С. Дослідження турбоімпактного осадження частинок багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / Рижков С.С., Рижков Р.С., Борцов О.С. // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 134-136.

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

171. Рыжков С.С. Интенсификация процессов очистки дисперсных двухфазных сред с помощью пульсационных элементов для экологических и ресурсосберегающих технологий [Текст] / Рыжков С.С. // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII Міжнародної науковотехнічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 26-28.

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

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

174. Рыжков С.С. Синтез аэрозольных градиентных технологии при интенсификации процессов очистки в дисперсных многофазных средах объектов морской инфраструктуры [Текст] / Рыжков С.С., Шевцов А.П. //

Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2015. – С. 265-267.

175. Рыжков С.С. Аэрозольные градиентные технологии как комплексный подход к решению проблем энергосбережения и экологии объектов морской инфраструктуры [Текс] / Рыжков С.С., Шевцов А.П. // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2015. – С.17-18.

176. Рыжков С.С. Моделирование процессов осаждения аэрозолей в пограничных слоях многофункциональных поверхностей энергетических установок / Рыжков С.С., Борцов О.С. // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2016. – С.84-85.

177. Рыжков С.С. Інтенсифікації імпакттурбулентної сепарації газопарорідинної суміші конденсацією / Рыжков С.С. // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали XI Міжнародної науковотехнічної конференції. – Миколаїв, 2016. – С.132-139.

178. Рыжков С.С. Розробка аерозольних градієнтних технологій для систем життєзабезпечення суден і кораблів / Рыжков С.С. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VII Міжнародної науковотехнічної конференції. – Миколаїв, 2016. – С. 123-125.

179. Рыжков, С. С. Осаждение жидких частиц газового потока в неизотермических каналах [Текст] / С. С. Рыжков, Н. А. Гончарова // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації : зб. наук. праць І Міжнар. наук.-техн. конф. Ч. 2. – Миколаїв : НУК, 2008. – С. 256–263.

додатки

Додаток А



Рисунок А.1 – Розрахунок розподілу швидкості та статичного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при U = 5 м/с

Додаток А



Рисунок А.2 – Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності та динамічного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при U = 5 м/с

Додаток А



Рисунок А.3 – Розрахунок розподілу швидкості та статичного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при *U* = 10 м/с


Рисунок А.4 – Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності та динамічного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при *U* = 10 м/с



Рисунок А.5 – Розрахунок розподілу швидкості та статичного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при *U* = 15 м/с



Рисунок А.6 – Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності та динамічного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при *U* = 15 м/с



Рисунок А.7 – Розрахунок розподілу швидкості та статичного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при *U* = 20 м/с



Рисунок А.8 – Розрахунок розподілу кінетичної енергії турбулентності та динамічного тиску для каналу радіусом 5, 10, 15, 20, 25 мм при U = 20 м/с



Рисунок Б.1 – Розподіл швидкості в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при $U_0 = 5$ м/с

Додаток Б









Рисунок Б.2 – Розподіл кінетичної енергії турбуленції в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при U₀ = 5 м/с



Рисунок Б.3 – Розподіл швидкості в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при U₀ = 10 м/с

Додаток Б



Рисунок Б.4 – Розподіл кінетичної енергії турбуленції в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при U₀ = 10 м/с





τ=0,2c





Рисунок Б.5 – Розподіл швидкості в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при $U_0 = 15$ м/с

Додаток Б



Рисунок Б.6 – Розподіл швидкості в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при $U_0 = 15$ м/с



Рисунок Б.7 – Розподіл кінетичної енергії турбуленції в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при U₀ = 15 м/с



Рисунок Б.8 – Розподіл швидкості в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при $U_0 = 20$ м/с



Рисунок Б.9 – Розподіл кінетичної енергії турбуленції в елементі сіткового гофрованого коагулятора при поперечних пульсаціях у колірній цифровій гаммі при U₀ = 20 м/с



Рисунок В.1 – Розподіл величин (5-а секунда): а) кадр кінограми; б) відновлена інтерферограма; в) розподіл температури по відновленій інтерферограмі; г) розподіл температури;

д), *е*) розподіл швидкості



Рисунок В.2 – Розподіл величин (10-а секунда): *а)* кадр кінограми; *б)* відновлена інтерферограма; *в)* розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г)* розподіл температури; *д)*, *е)* розподіл швидкості



Рисунок В.3 – Розподіл величин (15-а секунда): *а)* кадр кінограми; *б)* відновлена інтерферограма; *в)* розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г)* розподіл температури; *д)*, *е)* розподіл швидкості



Рисунок В.4 – Розподіл величин (20-а секунда): *а)* кадр кінограми; *б)* відновлена інтерферограма; *в)* розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г)* розподіл температури; *д)*, *е)* розподіл швидкості



Рисунок В.5 – Розподіл величин (22-а секунда):

а) кадр кінограми; б) відновлена інтерферограма; в) розподіл температури

по відновленій інтерферограмі; г) розподіл температури;

д), е) розподіл швидкості



Рисунок В.6 – Розподіл величин (24-а секунда): *а)* кадр кінограми; *б*) відновлена інтерферограма; *в*) розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г*) розподіл температури; *д*), *е*) розподіл швидкості



Рисунок В.7 – Розподіл величин (26-а секунда): *а)* кадр кінограми; *б)* відновлена інтерферограма; *в)* розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г)* розподіл температури; *д)*, *е)* розподіл швидкості



Рисунок В.8 – Розподіл величин (28-а секунда): *а)* кадр кінограми; *б)* відновлена інтерферограма; *в)* розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г)* розподіл температури;

д), е) розподіл швидкості



Рисунок В.9 – Розподіл величин (30-а секунда):

а) кадр кінограми; *б)* відновлена інтерферограма; *в)* розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г)* розподіл температури;

д), е) розподіл швидкості



Рисунок В.10 – Розподіл величин (36-а секунда): *а)* кадр кінограми; *б)* відновлена інтерферограма; *в)* розподіл температури по відновленій інтерферограмі; *г)* розподіл температури; *д)*, *е)* розподіл швидкості



Рисунок Г.1 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі з початковою швидкістю: *а)* 0,5 м/с; *б)* 1 м/с; *в)* 3 м/с; *г)* 5 м/с



Рисунок Г.1 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі з початковою швидкістю (лист 2): *д*) 10 м/с; *е*) 15 м/с; ж) 20 м/с



Рисунок Г.2 – Розподіл статичного тиску в каналі з початковою швидкістю: *а)* 0,5 м/с; *б)* 1 м/с; *в)* 3 м/с; *г)* 5 м/с



Рисунок Г.2 – Розподіл статичного тиску в каналі з початковою швидкістю (лист 2): *д*) 10 м/с; *е*) 15 м/с; *ж*) 20 м/с



Рисунок Г.3 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі з початковою швидкістю:

а) 0,5 м/с; б) 1 м/с; *в*) 3 м/с; *г*) 5 м/с



Рисунок Г.3 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі з початковою швидкістю (лист 2):

д) 10 м/с; *е)* 15 м/с; *ж)* 20 м/с



Рисунок Г.4 – Розподіл статичного тиску в каналі з початковою швидкістю: *a)* 0,5 м/с; *б)* 1 м/с; *в)* 3 м/с; *г)* 5 м/с



Рисунок Г.4 – Розподіл статичного тиску в каналі

з початковою швидкістю (лист 2):

д) 10 м/с; *е)* 15 м/с; *ж)* 20 м/с







Рисунок Г.5 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі з початковою швидкістю:

а) 0,5 м/с; б) 1 м/с; *в*) 1,5 м/с



Рисунок Г.5 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі з початковою швидкістю (лист 2):

г) 2 м/с; *д*) 2,5 м/с; *е*) 5 м/с



Рисунок Г.5 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі з початковою швидкістю (лист 3): *ж*) 7 м/с; 3) 10 м/с; *и*) 15 м/с

395



Рисунок Г.6 – Розподіл статичного тиску в каналі з початковою швидкістю: a) 0,5 м/с; б) 1 м/с; b) 1,5 м/с


Рисунок Г.6 – Розподіл статичного тиску в каналі з початковою швидкістю (лист 2): *г*) 2 м/с; *д*) 2,5 м/с; *е*) 5 м/с



Рисунок Г.6 – Розподіл статичного тиску в каналі з початковою швидкістю (лист 3): ж) 7 м/с; з) 10 м/с; и) 15 м/с



Рисунок Г.7 – Розподіл амплітуди швидкостей у каналі

з початковою швидкістю:

а) 0,5 м/с; б) 1 м/с; *в*) 1,5 м/с; *г*) 2 м/с



д) 2,5 м/с; *е*) 5 м/с; *ж*) 7 м/с; *з*) 10 м/с; *u*) 15 м/с

400



Рисунок Г.8 – Розподіл статичного тиску в каналі з початковою швидкістю: *a)* 0,5 м/с; *б)* 1 м/с; *в)* 1,5 м/с; *г)* 2 м/с

401



на корисну модель № 102840

HANGER YKPAIDE

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ РІДИНИ ВІД ГАЗУ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.11.2015.

Голова Державної служби інтелектуальної власності України

Г. Жарінова

на корисну модель № 68673

YKPAIHA

СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОПЕРЕНОСУ ТУРБУЛЕНТНИХ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.04.2012.

Голова Державної служби інтелектуальної власності України

електуал

М.В. Паладій

UKRAINE

ΠΑΤΕΗΤ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 64322

УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.11.2011.

Голова Державної служби інтелектуальної власності України

україна

М.В. Паладій

TRANCE

YKPAÏHA

на винахід № 114207

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ РІДИНИ ВІД ГАЗУ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 10.05.2017.

В.о. Голови Державної служби інтелектуальної власності України

телектуал

50

А.А.Малиш

Додаток Е.1





BATUMI NAVIGATION TEACHING UNIVERSITY Ltd. 6000, Batumi, Georgia 38, Tamar Mephe Av. MAKHINJAURI, Tel. +995422 254292, Fax 253749 E-mail: info@bntu.edu.ge bmc-mercury@rambler.ru www.bntu.edu.ge

оъбодо /Date 14 041. 2017 № 05/202

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

about the implementation of Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) doctor of technical science dissertation results to the field of the control processes of separation technology

The present Act-Certificate confirms that Batumi Navigational Teaching University implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice of designing of ship separation equipment according cooperation contract:

- Design of ship separator for cleaning air in engine room.

The results of dissertation work implemented in Batumi Navigational Teaching University and used for the manufacture of ship and power energy equipment supplies.

Yours sincerely,

Rector Dr. Prof. P. Khvedefidze APR







China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering

Address: No. 2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu. Post Code: 212003, CPR Tel.: 86-511-84401190

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

OF CONTRACT № 03.2013/02 "THE DEVELOPMENT OF SHIP MULTIFUNCTIONAL LIQUID LEVEL REMOTE MEASUREMENT AND ALARM SYSTEM"

about the implementation of Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) doctor of technical science dissertation results to the field of the control processes of separation technology

The present Act-Certificate confirms that China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice of designing of equipment according contract CONTRACT № 03.2013/02:

 Design of system to control and separate different liquids (water, oil, etc.) in regular and irregular volumes.

The results of dissertation work implemented by China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering (China) and used for the manufacture of ship and power energy equipment.

Yours sincerely,

China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering

JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY SCHOOL OF ENERGY AND POWER ENGINEERING

Address: No. 2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu. Post Code: 212003, CPR Tel.: 86-511-84401190

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

OF CONTRACT No.04/2016/1 BOOK FORMAT DESIGN AND CONTENT PREPARATION "THERMOTECHNICAL MEASUREMENTS AND INSTRUMENTS IN SHIP POWER PLANTS"

about the implementation of Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) doctor of technical science dissertation results to the field of the control processes of separation technology

The present Act-Certificate confirms that SCHOOL OF ENERGY AND POWER ENGINEERING OF JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice of designing of equipment according contract CONTRACT № 04/2016/1:

- Design of measurement technologies for the research of turbulent poly-disperse phase for the analysis of separating equipment catching efficiency.

The results of dissertation work implemented by SCHOOL OF ENERGY AND POWER ENGINEERING OF JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY and used for the manufacture of ship and power energy equipment.

Yours sincerely,

Jiangsu University of Science and Technology,

No.2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu. Poust code:212003, CPR, tel.86-511-84401190.



China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering

Address: No. 2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu. Post Code: 212003, CPR Tel.: 86-511-84401190

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

OF CONTRACT No.11/2014/1"DESIGN OF SOLAR-HYDROGEN METAL-HYDRIDE POWER PLANT"

about the implementation of Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) doctor of technical science dissertation results to the field of the control processes of separation technology

The present Act-Certificate confirms that China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice of designing of equipment according contract CONTRACT № 11/2014/1:

- Design of Hydrogen technological system for cleaning and separation for hydride

hydrogen storage and compressor unit.

The results of dissertation work implemented by China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering (China) and used for the manufacture of ship and power energy equipment.

Yours sincerely,

China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering



შ.პ.ს. "საზღვაო ტექსერვისი" საქართველო, ბათუმი 6000, ნონეშვილის ქ. № 63 ტელ.: +995 422 21-67-60 ფაქსი: +995 422 25-27-60 მობ.: +995 599 144026 ელ-ფოსტა: <u>mts@mts.ge; martec@mail.ru</u>



"MARINE TECHNICAL SERVICE" LTD № 63, Noneshvili Street, Batumi 6000, Georgia Tel.: +995 422 21-67-60 Fax: +995 422 25-27-60 Mob.: +995 599 144026 / E-mail: <u>mts@mts.ge; martec@mail.ru</u>

№ 01-16/70

16 June 2017 Y

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

about the implementation of Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) doctor of technical science dissertation results to the field of the control processes of separation technology

The present Act-Certificate confirms that Marine Technical Service LTD implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice of designing of ship separation equipment according cooperation contract:

 Design of separator for cleaning compressed air from solid and liquid particles for high pressure ship equipment.

The results of dissertation work implemented Marine Technical Service LTD and used for the manufacture of ship and power energy equipment supplies.

Yours sincerely, Director CAL SERVIC

Solomon Chkhaidze

Додаток Е.6

შპს. "სი-სერვისი" საქართველო ქ.ბათუმი,ბარათაშვილის ქ N26 მობ: (+995 593) 50 25 85 ელ-ფოსტა: <u>seaservice100@gmail.com</u>



"SEA SERVICE" LTD Baratashvili Street №26,Batumi,Georgia Mobile: (+995 593) 50 25 85 E-mail: seaservice100@gmail.com

N 2017/02

03 May 2017 Y.

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

about the implementation of Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) doctor of technical science dissertation results to the field of the control processes of separation technology

The present Act-Certificate confirms that Sea Service LLC implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice of designing of ship separation equipment according cooperation contract:

-Design of separator for cleaning compressed air from solid and liquid particles for high pressure ship equipment.

The results of dissertation work implemented Sea Service LLC and used for the manufacture of ship and power energy equipment supplies.





ДП «ПКБ ЧОРНОМОРСУДНОПРОЕКТ»

SC «Design Bureau CHERNOMORSUDOPROJECT» 54038, Україна, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5 тел.: +38 0512 34 10 60 м.тел.: +38 067 264 54 44 факс: +38 0512 34 01 45 www.chsp.mksat.net e-mail: chsp.pjsc@gmail.com

5, Buznika str., Nikolaev, 54038, Ukraine МРУ "Приватбанк" м.Миколаїв роз. рахунок: 26006053207933 ЄДРПОУ: 38524933 MOC: 326610

Исходящий №

2017 г. om «____»____

АТВЕРДЖУЮ В.М. Пікінер директор RTPOSKI 2017 p. N.MHK

про впровадження результатів дисертаційної роботи Рижкова С.С. на тему «Розробка суднових систем очищення повітря від краплинної вологи»

АКТ

Ми, що нижче підписалися, технічний директор Панков Володимир Володимирович, заступник головного конструктора Назаров Олег Максимович розробках ЩО В проектних склали пей акт про те. ДП «ПКБ Чорноморсуднопроект» було використано наступні результати, отримані в дисертаційній роботі:

- конструктивні рішення для витрат повітря від 20 до 2000 м³/годину при розробці систем очищення повітря від краплинної вологи для технічного кондиціюування приміщень машинного відділення для проектів науководослідних суден;

- тривимірну модель робочих каналів судових систем очищення повітря від краплинної вологи та результати математичного моделювання для швидкостей потоку 5, 10, 15, 20 м/с у сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм під час створення проектної документації для учбового комплексу «Навчально-лабораторного тренажеру енергетичної установки судна».

Суднові сепаратори, які були розроблені Рижковим С.С., включено до переліку постачальників обладнання для проектів науково-дослідних суден, які зараз розробляє ДП «ПКБ Чорноморсуднопроект».

виражену практичну спрямованість, представляє Робота має ДЛЯ підприємства безперечний інтерес, а її результати є визначальними при розробленні суднових сепараторів з коефіцієнтом осадження краплинної вологи до 99,9%.

Технічний директор

wou in

Панков В.В.

Заст. головного конструктора

Назаров О.М.

413

Додаток Е.8

«ЗАТВЕРДЖУЮ» Заступник генерального директора -Генеральний конструктор ГІКГ «Зоря»-«Машпроект» Б.В. Ісаков 03 2014 p.

АКТ впровадження результатів науково-дослідних робіт, що отримані **Рижковим Сергієм Сергійовичем** при виконанні дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Даний акт складений про те, що при виконанні науково-дослідних робіт за господарським договором № 2077 від 01.06.2012/1875 «Розробка сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій» між ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» і Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова отримані Рижковим Сергієм Сергійовичем, як науковим керівником, результати розрахункових досліджень дозволили визначити оптимальну конструкцію уніфікованого сепараційного модулю, яка забезпечує мінімальні значення перепадів тисків на всіх режимах роботи.

Результати вищевказаних науково-дослідних робіт застосовуються на підприємстві при проектуванні та порівняльній оцінці ефективності сепараторів паливного газу, призначених для очистки робочого середовища від механічних домішок та рідких фракцій перед подачею газу у паливну систему газотурбінних двигунів виробництва ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект».

Заст. генерального конструктора – начальник конструкторського відділення, к.т.н. Сорессив.М. Чобенко Начальник відділу паливної апаратури О.І. Засипко

ХАРБИНСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СУДОВЫХ КОТЛОВ И ТУРБИН (ХИИСКТ), КНР

АКТ

Внедрения работ по контракту № 1665

«РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО МАСЛООТДЕЛИТЕЛЯ»

Представитель Заказчика: **Харбинский исследовательский институт судовых котлов и турбин (ХИИСКТ), КНР** в лице директора Цзо Цзи Го

составил настоящий акт о том, что согласно контракту № 1665 главным исполнителем работ являлся Рыжков Сергей Сергеевич. В ходе выполнения работы были использованы научные достижения исполнителя в области создания высокоэффективных сепараторов для ГТД. В работе Рыжков С.С. предложил модель многоуровневой системы очистки для разработки рекомендаций и построения устройств сепарации дисперсных сред для экологических и энергетических установок, которая состоит из:

- Уровень № 1 (INS) Технология инерционной сепарации
- Уровень № 2 (GTUS) Технология градиентной турбофоретичной сепарации
- Уровень № 4 (GAFS) Технология градиентной акустикофоретичной сепарации
- В рамках контракта были выполнены в полном объеме следующие работы:

Разработка принципиальной схемы маслоотделителя. Выполнение расчета и анализа ступеней очистки маслоотделителя на основе экспериментальных исследований и теоретических расчетов с применением пакета ФЛЮЕНТ. Выбор рациональных значений рабочих параметров. Разработка и изготовление рабочих чертежей на опытный образец маслоотделителя в системе AUTOCAD. Доработка экспериментального стенда на заданные параметры маслоотделителя. Изготовление необходимых элементов стенда. Разработка программы и методики проведения испытаний опытного образца на экспериментальном стенде. Изготовление опытного образца маслоотделителя и корректировка рабочих чертежей. Окончательных изменений в конструкцию маслоотделителя и корректировка рабочих чертежей. Окончательная доработка образца маслоотделителя. Составление современной методики расчета маслоотделителя. Написание заключительного отчета по теме.

От Института



Додаток Е.10

შპს. "ჯორჯიან ვერიტასი" ქ. ბათუმი ნონეშვილის №63 ტელეფონი: (+995 422) 253 153 მობ: (+995 593) 50 25 85 ელ-ფოსტა: tornike.chkhaidze@georgianveritas.cm



"Georgian Veritas" LTD Noneshvili Street №63,Batumi,Georgia Phone: (+995 422) 253 153 Mobile: (+995 593) 50 25 85 E-mail: tornike.chkhaidze@georgianveritas.cm

№ 32

28/05/2017

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

about the implementation of Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) doctor of technical science dissertation results to the field of the control processes of separation technology

The present Act-Certificate confirms that Georgian Veritas LLC implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice of designing of ship separation equipment according cooperation contract:

-Design of separator for cleaning compressed air from solid and liquid particles for high pressure ship equipment.

The results of dissertation work implemented Georgian Veritas LLC and used for the manufacture of ship and power energy equipment supplies.



SHENGZHOU SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATION SERVICE CENTER

Address: 嵊州市官河南路 333 号商会大厦 8 楼 Tel.: 86-575-83267006

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

of doctor of technical science degree work implementation

according to TECHNICAL AGREEMENT in the topic of:

"SEPARATION GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES IN ENERGY INSTALLATIONS"

Purpose of work: implementation of separation technologies of

Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) to the industry and market of China

The present Act-Certificate confirms that according to technical agreement company implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice:

Equipment type: Acoustico-phoretic Separator

- SPA 200 for G = 100...200 m³/h
- SPA 800 for G = 400...800 m³/h

Separation technology level usage for the development of equipment:

- Level # 1 (INS) Inertial Separation Technology
- Level # 2 (GTUS) Gradient Turbophoretic Separation Technology
- Level # 4 (GAFS) Gradient acoustic-phoretic technology



QUZHOU MEICHUANG INSTRUMENT CO. LTD

Address: 衢州市凯旋南路 6 号 1 幢 306 室 Tel.: 86-570-8882608

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

of doctor of technical science degree work implementation

according to TECHNICAL AGREEMENT in the topic of:

"SEPARATION GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES IN ENERGY INSTALLATIONS"

Purpose of work: implementation of separation technologies of

Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) to the industry and market of China

The present Act-Certificate confirms that according to technical agreement company implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice:

Equipment type: Systems of air separation and cleaning from humidity water drops

	SPW 6,3	G = 630-1600 m ³ /h
	SPW 10,0	G = 1000-2500 m ³ /h
	SPW 16,0	G = 1600-4000 m ³ /h
	SPW 25,0	G = 2500-6300 m ³ /h
	SPW 40,0	G = 4000-10000 m ³ /h
	SPW 63,0	G = 6300-16000 m ³ /h
	SPW 100,0	G = 10000-16000 m ³ /h
	SPW 1160	G = 16000-25000 m ³ /h
	SPW 1250,0	G = 25000-40000 m ³ /h
	SPW 1400,0	G = 30000-40000 m ³ /h
	SPWS 16.0	G = 1600-4000 m ³ /h
	SPWS 25.0	G = 2500-6300 m ³ /h
	SPWS 40,0	G = 4000-10000 m ³ /h
•	SPWS 63,0	G = 6300-16000 m ³ /h

Separation technology level usage for the development of equipment:

- Level # 1 (INS) Inertial Separation Technology
- Level # 2 (GTUS) Gradient Turbophoretic Separation Technology



SHENGZHOU ALENT ENTERPRISE MANAGEMENT CONSULTING CO. LTD

Address: 嵊州市三江街道官河南路 333 号 Tel.: 86-575-83267002

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

of doctor of technical science degree work implementation

according to TECHNICAL AGREEMENT in the topic of:

"SEPARATION GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES IN ENERGY INSTALLATIONS"

Purpose of work: implementation of separation technologies of

Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) to the industry and market of China

The present Act-Certificate confirms that according to technical agreement company implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice:

Equipment type: Flat Thermophoretic Separator • SPT-500 for G = 100...500 m³/h

Separation technology level usage for the development of equipment:

- Level # 1 (INS) Inertial Separation Technology
- Level # 2 (GTUS) Gradient Turbophoretic Separation Technology
- Level # 3 (GTFS) Gradient Thermophoretic Separation Technology



QUZHOU AISHANG INDUSTRIAL DESIGN CO. LTD

Address: 衢州市凯旋南路 6 号 1 幢 308 室 Tel.: 86-570-8882809

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

of doctor of technical science degree work implementation

according to TECHNICAL AGREEMENT in the topic of:

"SEPARATION GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES IN ENERGY INSTALLATIONS"

Purpose of work: implementation of separation technologies of

Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) to the industry and market of China

The present Act-Certificate confirms that according to technical agreement company implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice:

Equipment type: Separator of crankcase gases of internal combustion engines • SP-10 for G = 0,1...10 m³/h

Separation technology level usage for the development of equipment:

- Level # 1 (INS) Inertial Separation Technology
- Level # 2 (GTUS) Gradient Turbophoretic Separation Technology



ZHEJIANG ACME INFO TECHNOLOGY CO., LTD

Address: 浙江省嵊州市官河南路 333 号商会大厦 8 楼 Tel.: 86-575-83267001

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

of doctor of technical science degree work implementation

according to TECHNICAL AGREEMENT in the topic of:

"SEPARATION GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES IN ENERGY INSTALLATIONS"

Purpose of work: implementation of separation technologies of

Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) to the industry and market of China

The present Act-Certificate confirms that according to technical agreement company implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice:

Equipment type: Separators of compressed gases of power systems

- SP-100 for G = 50...100 m³/h
- SP-200 for G = 100...200 m³/h
- SP-400 for G = 200...400 m³/h
- SP-800 for G = 400...800 m³/h

Separation technology level usage for the development of equipment:

- Level # 1 (INS) Inertial Separation Technology
- Level # 2 (GTUS) Gradient Turbophoretic Separation Technology



ZHEJIANG YUNDYNAMIC INVESTMENT MANAGEMENT CO. LTD

Address: 嵊州市官河南路 333 号商会大厦 8 楼 Tel.: 86-575-83267005

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

of doctor of technical science degree work implementation

according to TECHNICAL AGREEMENT in the topic of:

"SEPARATION GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES IN ENERGY INSTALLATIONS"

Purpose of work: implementation of separation technologies of

Ryzhkov Sergiy (Passport EK864593) to the industry and market of China

The present Act-Certificate confirms that according to technical agreement company implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Ryzhkov S.S. doctor of technical science dissertation results in the practice:

Equipment type: Cylindrical Thermophoretic Separator • SPT-140 for G = 10...140 m³/h

Separation technology level usage for the development of equipment:

- Level # 1 (INS) Inertial Separation Technology
- Level # 2 (GTUS) Gradient Turbophoretic Separation Technology
- Level # 3 (GTFS) Gradient Thermophoretic Separation Technology





2016 №89

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "ЗАВОД "ЕКВАТОР" 54020, УКРАЇНА, м. МИКОЛАЇВ, вул. ДЕКАБРИСТІВ, 60 тел.:+38 (0512) 58 09 03 e-mail: mail@zavod-ekvator.com факс: +38 (0512) 58 09 10 http://www.zavod-ekvator.com

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних робіт,

РОЗРОБКА СУДНОВИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД КРАПЛИННОЇ ВОЛОГИ

що отримані Рижковим Сергієм Сергійовичем

при виконанні дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Даний акт складений про те, що ПАТ "Завод "Екватор" спільно з Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова здійснива розробку суднових сепараторів для технічного кондиціонування приміщень машинного відділення суден при виконанні дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук **Рижковим Сергієм Сергійовичем.**

Умовне позначення	Об'ємна витрата повітря, м ³ /годину	Аеродинамічний опір, ПА (мм.вод.ст.)
SPW 6,3	630-1600	40-250
SPW 10,0	1000-2500	55-315
SPW 16,0	1600-4000	40-250
SPW 25,0	2500-6300	40-250
SPW 40,0	4000-10000	45-315
SPW 63,0	6300-16000	40-250

Згідно акут впроваджено: Система очищення повітря від краплинної вологи

та використано наступні технолоїї:

- Рівень № 1 (INS) Технологія інерційної сепарації
- Рівень № 2 (GTUS) Технологія градієнтної турбофоретичної сепарації

В рамках роботи було виконано дослідження газодинаміки та коефіцієнтів осадження сепараційного профілю. Отримано розподіл швидкості, статичного тиску, динамічного тиску, кінетичної енергії турбулентності та коефіцієнтів осадження для швидкостей потоку 5, 10, 15, 20 м/с у сепаруючих профілях з радіусами 5, 10, 15, 20, 25 мм. Коефіцієнт осадження краплинної вологи складає 99,9%.



Розрахунок економічного ефекту

Розрахунок економічного ефекту виконано від упровадження турбоімпактних сепараторів паливних газів у системі паливопідготовки трьох ГТД ДН80 виробництва ДП НВКГ «Зоря»—«Машпроект» з витратою природного газу 6500 кг/год. Розрахунок виконано на основі «Методики розрахунку економічної ефективності в народному господарстві» [51, 52]:

$$E = \left[\left(B_1 - B_2 \right) + \frac{\left(BE_1 - BE_2 \right) - E_{_{\rm H}} \left(K_2 - K_1 \right)}{P_2 + E_{_{\rm H}}} \right] A_2,$$

де B_1 , B_2 – приведені витрати базових паливних фільтрів та турбоімпактних сепараторів; BE_1 , BE_2 – річні експлуатаційні витрати для базової системи та системи з турбоімпактними сепараторами; $E_{\rm H} = 0,15$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності; K_1 , K_2 – супутні капітальні витрати при експлуатації базової і нової систем; P_2 – коефіцієнт реновації сепаратора: $P_2 = 1 / T_{\rm вик} = 0,05$ ($T_{\rm вик}$ – термін використання = 20 років); A_2 – кількість сепараторів (дорівнює кількості двигунів).

Річні витрати

$$BE = BE_3$$
,

де *BE*₃ – витрати від замін штатних фільтрів, що обчислюються таким чином:

$$BE_3 = N_1 \cdot C_{1\phi},$$

де N_1 – середня кількість замін фільтрів на рік; $C_{1\phi}$ – вартість системи фільтрів, доларів США.

Вартість системи очистки природного газу на три двигуна ДН80 з базовими (штатними) фільтрами складає 20 000 доларів США.

Середнє напрацювання фільтрів до заміни складає близько 3600...3800 год. Час роботи ГТД газоперекачувального агрегату за рік T = 320 днів = 7680 годин.

Тоді коефіцієнт N_1 на рік складає 7680/3800 \approx 2,0.

Системи з турбоімпактними фільтрами потребують заміни елементів один раз на два роки (15360 годин).

Таким чином, коефіцієнт N_2 складає 7680/15360 = 0,5.

Вартість додаткових супутніх капітальних витрат K_2 на турбоімпактну систему оцінюється в 2000 доларів США.

Кількість працюючих двигунів $A_2 = 3$, тоді економічний ефект складатиме:

$$E = \left[(B_1 - B_2) + \frac{(BE_1 - BE_2) - E_{H}(K_2 - K_1)}{P_2 + E_{H}} \right] A_2 =$$

$$= \left[(500 - 500) + \frac{((20000 \times 2) - (20000 \times 0.5) - 0.15(2000 - 0))}{0.05 + 0.15} \right] =$$

$$= \left[0 + \left[\frac{(29700)}{0.2} \right] \approx 150000 \$.$$

Таким чином, упровадження турбоімпактних сепараторів у систему очистки природного газу трьох ГТД ДН80 дає розрахунковий економічний ефект за шість років експлуатації для ПАТ «Укртрансгаз» біля 150 тис. доларів США.