

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

РИЖКОВ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 622.767.66

**ТЕРМОФОРЕТИЧНЕ ОСАДЖЕННЯ РІДКИХ ЧАСТИНОК
ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКУ**

Спеціальність 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика"

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий керівник:

Член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук **Басок Борис Іванович**,
Інститут технічної теплофізики НАН України, заступник директора з наукової роботи.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
провідний науковий співробітник
Нікітенко Микола Іванович,
Інститут технічної теплофізики НАН України.

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Дубровський Віталій Володимирович,
Інститут загальної енергетики НАН України.

Провідна установа:

Інститут Газу НАН України.

Захист відбудеться «_____» 2007 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 при Інституті технічної теплофізики Національної академії наук за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

Автореферат розісланий «_____» 2007 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої
ради, кандидат
технічних наук



О.І. Чайка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день спостерігається підвищений інтерес до вивчення дисперсних двофазних газових середовищ. Це пояснюється зростаючою роллю таких середовищ у енергетиці, хімічній і нафтогазовій та інших галузях промисловості. Робочі тіла теплових двигунів, що працюють як за газовим, так і за паровим циклами, по суті є дисперсними двофазними газовими середовищами. У паротурбінних установках двофазні робочі середовища утворюються при розширенні пари в останніх ступенях турбін. У дизельних і газотурбінних установках утворення двофазних середовищ відбувається на початковій стадії робочих процесів безпосередньо в камерах згоряння при диспергуванні палива, а потім у ході складних ланцюгових реакцій горіння. Важливу роль дисперсні двофазні газові середовища відіграють у технологічних процесах випарювально-сушильних агрегатів.

При впровадженні нових енергетичних установок доцільним є розв'язання актуальної проблеми очищення газів від рідкої фази, оскільки при її підвищених концентраціях знижується економічність, довговічність, а також погіршуються експлуатаційні якості. Підвищення якості очищення дозволяє не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища, але й знизити витрати палива шляхом утилізації низькопотенціальної енергії газових викидів, а також скоротити витрати дорогих матеріалів. Наприклад, для системи суфлювання газотурбінних двигунів (ГТД) доцільно розробити масловіддільники, що забезпечують конденсацію пари легких фракцій масла та повернення їх у систему.

Створення високоефективного газоочисного обладнання є значним резервом підвищення економічності енергетичних установок та поліпшення використання паливно-енергетичних ресурсів, а тому є важливим завданням сьогодення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає програмам і планам виконання фундаментальних науково-дослідницьких робіт «Дослідження та інтенсифікація процесів турбо- і термофоретичного переносу дисперсної фази при очищенні та розділенні робочих двофазних середовищ» (№ держ. реєстрації 0103U001794); «Вивчення теплофізичних та гідродинамічних основ дискретно-імпульсного введення енергії з метою створення нанотехнологічних процесів» (0102U002197); «Нестійкість та гідродинаміка одно- та двофазних течій процесів ДІВЕ (0105U006230) у яких автор виступав виконавцем окремих розділів.

Мета роботи полягає у проведенні теплофізичних досліджень методів інтенсифікації термофоретичного осадження рідких вискодисперсних частинок у процесі очищення газового потоку та у створенні на основі отриманих результатів малогабаритних високоефективних термофоретичних очисників.

Для досягнення поставленої мети **необхідно розв'язати наступні завдання:**

- розробити узагальнену теплофізичну модель процесу турбулентного термофоретичного осадження рідких високодисперсних частинок у процесі очищення газового потоку;
- створити експериментальну установку для дослідження процесів уловлювання високодисперсних частинок у неізотермічному потоці;
- дослідити термофоретичне осадження частинок у неізотермічних каналах з розвинутими поверхнями осадження;
- розробити технологічну послідовність очищення, на її основі створити конструкції малогабаритних очисників дисперсних двофазних середовищ з інтенсивним термофоретичним уловлюванням мікрочастинок і провести їх випробування.

Об'єктом дослідження є дисперсні двофазні газові середовища, а **предметом** – процеси вловлювання рідких частинок у неізотермічних турбулентних дисперсних двофазних потоках.

Методи дослідження. Дослідження процесів очищення дисперсних двофазних середовищ проводилося теоретичними методами – шляхом створення нової теплофізичної моделі і розрахунками по ній, та експериментальними – голографічною інтерферометрією, оптичними вимірюваннями дисперсності та концентрації фаз, дослідженнями на стендах типу аеродинамічної труби. Використано системний підхід, де турбулентне дисперсне двофазне газове середовище вивчалось поетапно: спочатку однофазне газове середовище з визначенням гідродинамічних турбулентних характеристик, а потім отримані дані поширювалися на двофазне, де вивчався рух частинок. Розв'язання диференціальних рівнянь теплофізичної моделі здійснювалося на основі програмного продукту Fluent.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Уперше для розрахунків процесів осадження частинок у неізотермічних турбулентних дисперсних двофазних газових середовищах застосовано теплофізичну модель на основі транспортного рівняння напружень Рейнольда, яка оснований на законах збереження маси, енергії, імпульсу в турбулентній системі.

2. Теоретично та експериментально досліджено характеристики дисперсного двофазного газового потоку у неізотермічних гладких циліндричному й плоскому каналах, отримано розподіл швидкості, тиску, кінетичної енергії турбулентності, полів температур і виконано розрахунок осадження частинок в інтервалах: перепаду температур (20...80 °C), швидкостей (1...25 м/с), висот циліндричного та плоского каналів (5...30 мм) при концентрації дисперсної фази до 100 мг/м³ із середнім діаметром частинок 1...3 мкм. Встановлено, що зниження висоти каналу та підвищення перепаду температур збільшує ефективність очищення завдяки термофорезу у два-три рази. Розбіжність при порівнянні розрахунків тривимірної та двовимірної моделей для вловлювання аерозолів не перевищує 5 %, що підтверджується експериментальними даними. За рахунок термофорезу при швидкостях потоку

менше ніж 3 м/с інтенсивність осадження частинок у гладких каналах на 5...10 % вища ніж в ізотермічних умовах.

3. Методом голографічної інтерферометрії за допомогою швидкісної фотозйомки виконано візуалізацію потоку в каналі та отримано інтерферограми (термогідрограми), які відображають теплову та гідродинамічну обстановку середовища і в достатній мірі збігаються з даними розрахунків полів температур і швидкостей.

4. На основі теплофізичної моделі досліджено гідродинамічні характеристики турбулентного дисперсного двофазного газового потоку в неізотермічному циліндричному та плоскому каналах із сітковими коагуляторами та виконано розрахунок осадження частинок для коагуляторів з 1, 10, 20, 30, 40 рядами сіток. Установлено вплив швидкості потоку, перепаду температур, кількості рядів сіток коагулятора та його геометрії на осадження частинок. Експериментально підтверджено розрахункові дані про підвищення ефективності вловлювання вискодисперсних частинок у сіткових гофрованих коагуляторах на 25...30 % за рахунок сил термофорезу при швидкостях потоку менше 2 м/с і перепаді температур $\Delta T = 80^\circ\text{C}$.

5. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено технологічну послідовність та схему комплексної інтенсифікації термофоретичного осадження частинок у неізотермічних двофазних потоках, що зводиться до: використання температурного потенціалу дисперсних двофазних газових середовищ; створення градієнтів температур у пристінних областях; генерації турбулентних пульсацій сітковими гофрованими коагуляторами. Методи інтенсифікації реалізовано в базових конструкціях очисників таких середовищ.

На основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів сформульовано наступне **нове наукове положення**:

підвищення ефективності очищення дисперсних двофазних газових середовищ можливе за рахунок використання їх температурного потенціалу для термофоретичної інтенсифікації осадження частинок у неізотермічних гофрованих сіткових коагуляторах, що дозволяє створювати малогабаритні високоефективні газоочисні пристрої.

Обґрунтованість і вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректним застосуванням при розв'язанні завдань законів гідродинаміки одно- і двофазних середовищ та числових методів розв'язання диференційних рівнянь; адекватністю прийнятих допущень теплофізичної моделі реальним процесам, які відтворювалися на спеціальних стендах і вивчалися за допомогою сучасних засобів вимірювання неконтактного типу; задовільним збігом результатів розрахунків з експериментальними даними; результатами стендових, натурних випробувань, а також експлуатації очисних пристроїв у складі реальних ГТД.

Наукове значення роботи полягає в можливості застосування розробленої теплофізичної моделі для розрахунків характеристик дисперсних двофазних газових середовищ і використанні отриманих результатів для

створення екологічних та ресурсозберігаючих технологій у різних галузях народного господарства.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в розробці базових екологічних і ресурсозберігаючих пристроїв для очищення дисперсних двофазних газових середовищ із неізотермічними сітковими коагуляторами для різних витрат газу та вимог до ступеня очищення; малогабаритних високоефективних термофоретичних масловіддільників для систем суфлювання ГТД типу ДГ 90 (15 МВт) і ДН 80 (25 МВт); високоефективних очисників для систем технічного кондиціонування повітря; краплеуловлювачів для випарювально-сушильних агрегатів.

Результати роботи впроваджено на підприємстві "Зоря-Машпроект" при виробництві масловіддільників для ГТД типу ДГ 90 і ДН 80; в академії наук суднобудування України при проектуванні двигунів для суден; у навчальному та науковому процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача полягає у створенні: узагальненої теплофізичної моделі для розрахунків процесів термофоретичного осадження вискодисперсних рідких частинок у неізотермічних дисперсних двофазних газових потоках в каналах і в сіткових коагуляторах; схеми комплексної інтенсифікації термофоретичного переносу частинок, методики досліджень та проведенні на їх основі експериментів, а також узагальненні результатів; конструкцій термофоретичних очисників дисперсних двофазних газових середовищ.

Основні наукові результати теоретичних та експериментальних досліджень отримано автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи апробовано на 3-й і 4-й міжн. наук.-техн. конф. "Проблеми промислової теплотехніки" (м. Київ, 2003, 2005 рр.); на 1-й міжн. конф. "Когенерація в промисловості й комунальній енергетиці" (м. Київ, 2004 р.); на 3-й і 4-й міжн. наук.-техн. конф. "Проблеми енергозбереження та екології в суднобудуванні" (м. Миколаїв, 2002 і 2005 рр.); на міжнар. наук.-техн. конференції молодих учених "Суднова енергетика: стан і проблеми" (м. Миколаїв, 2005 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано у 15 друкованих наукових працях, у тому числі вісьмох статтях у наукових спеціалізованих виданнях ВАК України, інші – у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів і висновків. У додатках наведено акти та інші матеріали, що підтверджують упровадження результатів досліджень. Загальний обсяг дисертації становить 201 сторінку, серед яких 148 сторінок основного машинописного тексту, 75 малюнків і 10 таблиць. Бібліографія містить 153 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Структура та основний зміст роботи представлено на рис.1.

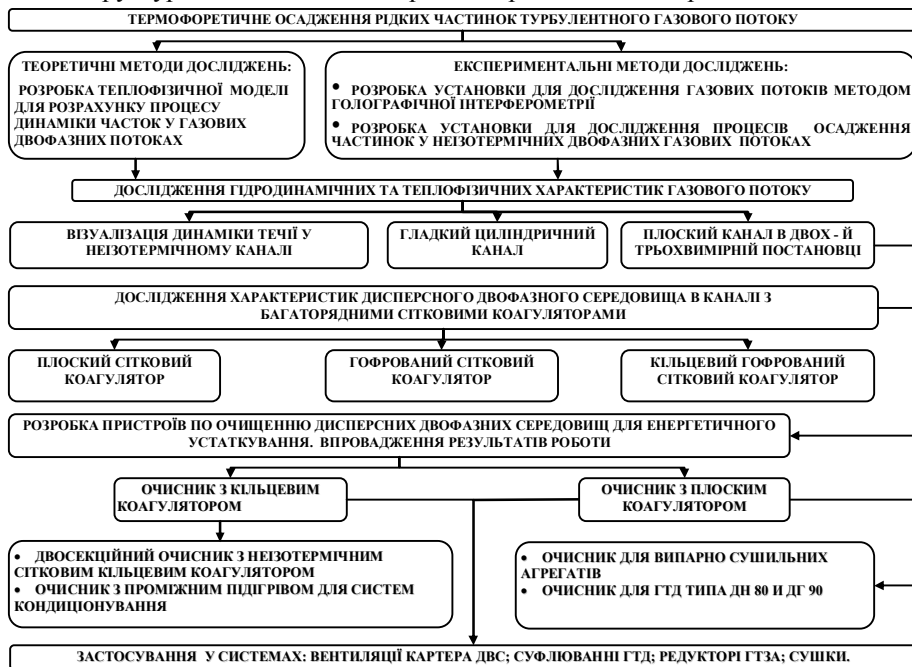


Рис. 1. Структурна схема роботи

У вступі обґрунтовано актуальність, сформульовано мету й завдання досліджень, відображено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи процесу осадження частинок при очищенні газових потоків. Показано актуальність проблеми вивчення дисперсних двофазних газових середовищ та джерел їх утворення. Визначено перспективні шляхи екологізації енергетичних установок за рахунок очищення та утилізації газових викидів з використанням їх потенціалу. Виконано оцінку інерційних властивостей аерозольних частинок.

Розглянуто основи сепарації дисперсних двофазних газових середовищ і основні механізми осадження частинок у турбулентних неізоtermічних потоках. Проаналізовано термофоретичне осадження частинок у температурних градієнтних полях. Розглянуто основи принципу дискретно-імпульсного введення і трансформації енергії (ДІВЕ) стосовно газових потоків з розподіленими високодисперсними рідкими частинками. Основними робочими елементами ДІВЕ є елементарний об'єм турбулентності та мікрочастинки рідини.

Проведено вибір напрямків інтенсифікації осадження частинок у неізотермічних турбулентних двофазних середовищах. Сформульовано мету та завдання досліджень.

У другому розділі здійснено вибір напрямків теоретичних та експериментальних досліджень. Для експериментальних досліджень обрано неконтактні методи: голографічну інтерферометрію, поверхневу індикацію потоку, швидкісну фотозйомку, фотоелектричні виміри дисперсності, концентрації частинок та ін. Створено експериментальну установку з аеродинамічним робочим участком для дослідження структури неізотермічних потоків двофазних газорідних середовищ голографічним методом. Розроблено й реалізовано експериментальну установку для дослідження процесів уловлювання частинок у неізотермічному дисперсному двофазному газовому потоці у вигляді аеродинамічної труби відкритого типу. Розроблено методику проведення вимірювань та оцінено її похибку.

Уперше для розрахунків процесів осадження частинок у неізотермічних турбулентних дисперсних двофазних газових середовищах застосовано теплофізичну модель, що складається з рівнянь: нерозривності, Нав'є–Стокса, напружень Рейнольдса, збереження енергії, а також рівняння балансу сил при русі частки.

Розрахунок динаміки в'язкого газу здійснюється за допомогою основного рівняння нерозривності і рівняння Нав'є–Стокса:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}. \quad (1)$$

Транспортне рівняння для напруження Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \\ &- \rho \left[\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - 2 \mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}, \end{aligned} \quad (2)$$

де u – швидкість потоку; u' – пульсаційна складова швидкості; μ_T – коефіцієнт турбулентної в'язкості; μ_L – коефіцієнт ламінарної в'язкості; x – координата; ρ – густина; $i, j, k = 1, 2, 3$ – індекси координати та векторних величин.

Для врахування неізотермічних параметрів виконано розрахунок конвективного теплопереносу за допомогою рівняння енергії:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\alpha + \frac{C_p \mu_T}{\text{Pr}_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right], \quad (3)$$

де α – коефіцієнт теплопровідності; E – повна енергія потоку; T – температура; Pr – число Прандтля; C_p – теплоємність; τ_{ij} – тензор напруження.

Систему доповнено рівняннями стану і зв'язку параметрів, початковими та граничними умовами. Це дозволяє робити розрахунки основних параметрів неізотермічного дисперсного двофазного турбулентного газового середовища та осадження частинок.

Динаміка руху частинок визначається рівнянням

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = \sum F_i, \quad (4)$$

де F_i – сили, що впливають на частинку (сила інерції, опору, турбофореа, термофореа, дифузіофореа).

Для розв'язання систем рівнянь (1) - (4) обрано програмний пакет Fluent.

Третій розділ присвячено дослідженню термофоретичного осадження рідких високодисперсних частинок у гладких неізотермічних каналах різних типів (рис. 2). Виконано дослідження характеристик дисперсного двофазного газового потоку в неізотермічному гладкому циліндричному каналі (рис. 2, а) за допомогою узагальненої теплофізичної моделі. При дослідженні розподілу швидкості (рис. 3, б) та статичного тиску в циліндричному каналі в області пристінних шарів та у центрі каналу установлено, що за розворотом потоку у верхній частині каналу виникає циркуляційна зона, що притискає вниз основний потік і перекриває переріз каналу, збільшуючи швидкість потоку в порівнянні з початковою на 10...50%. Розподіл кінетичної енергії турбулентності для гладкого циліндричного каналу показав, що зі збільшенням швидкості кінетична енергія турбулентності зростає в значно більшій мірі ніж сама швидкість.

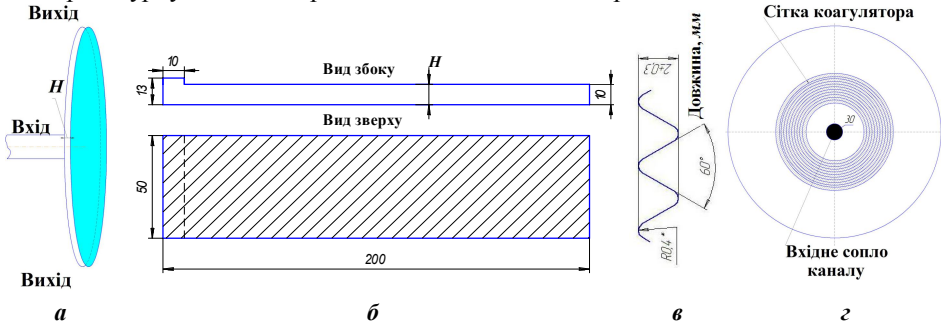


Рис. 2. Геометрія циліндричного (а), плоского (б) каналів та каналу з гофрованим (в) коагулятором: в – геометрія гофрованої сітки

Виконано експериментальні дослідження полів температур та осадження частинок у циліндричному неізотермічному каналі (рис. 2, б). Дослідження температурного поля дисперсного двофазного потоку в циліндричному каналі (рис. 3, а) показали збіг з даними теоретичного розрахунку. Розбіжність експериментальних та теоретичних даних не перевищує 5 %, що підтверджує адекватність розробленої теплофізичної моделі реальним процесам.

На основі узагальненої теплофізичної моделі виконано розрахунок (рис. 4) осадження частинок ($\eta_{\Sigma}=1-C_{\text{вих}}/C_{\text{вх}}$) у неізотермічному гладкому циліндричному каналі. Розбіжність при порівнянні результатів розрахунків та експериментів не перевищила 5 %.

Досліджено характеристики дисперсного двофазного газового потоку (рис. 5) у неізотермічному плоскому каналі у тривимірній постановці. Виявлено вплив неізотермічності на зміну швидкості й температури в каналі. Характерним є підвищення швидкості потоку після розвороту плоского струменя в порівнянні з початковою швидкістю у півтора рази, що обумовлено виникненням циркуляційної зони. Установлено, що характер розподілу кінетичної енергії турбулентності та розподіл статичного тиску практично не залежать від досліджуваного перепаду температури.

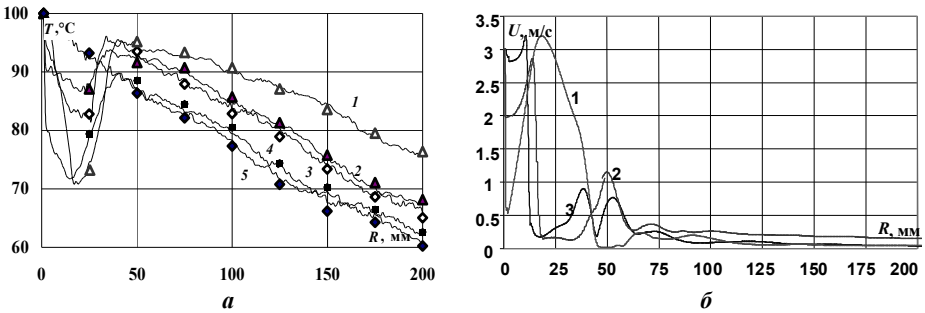


Рис. 3. Результати експериментальних вимірів розподілу температурного поля (а) та розрахунку розподілу швидкості (б) в циліндричному каналі при $H = 10 \text{ мм}$, $\Delta T = 80 ^\circ\text{C}$, $U_0 = 3 \text{ м/с}$: 1 – центр каналу; 2, 3 – на відстані 2 мм від нижньої й верхньої стінки каналу; 4, 5 – 1 мм (експериментальні дані); Δ , $\blacktriangle$, $\diamond$, $\blacksquare$, $\blacklozenge$ – (розрахункові дані)

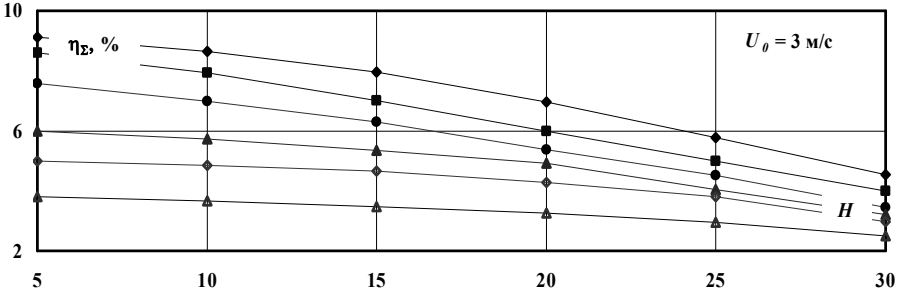


Рис. 4. Залежність коефіцієнта вловлювання каналом аерозолі від висоти каналу при різних перепадах температур ΔT : $\blacklozenge$ - 80; $\blacksquare$ - 70; $\bullet$ - 50; $\blacktriangle$ - 30; $\diamond$ - 20; Δ - 0° (без охолодження)

Найбільший вплив перепаду температур (сил термофорезу) на рух та осадження частинок дисперсної фази спостерігається при малих швидкостях (рис. 6). При збільшенні швидкості потоку збільшується вплив на дисперсну фазу інерційних та турбофоретичних сил, а ефект від термофорезу знижується. Збільшення швидкості приводить до зростання енергетичних витрат та можливого вторинного винесення дисперсної фази.

Паралельно з розрахунками тривимірної моделі каналу виконано розрахунок двовимірної моделі. Розрахунки коефіцієнта сумарної ефективності вловлювання аерозолі показали, що розходження між двома моделями не

перевищує 5 %, що підтверджується експериментальними даними. У двовимірній моделі не враховується осадження на бокових стінках, що для дослідженої висоти каналу $H = 10$ мм є несуттєвим (менше 2 %), тому надалі при виконанні інженерних розрахунків можливо використовувати двовимірну модель для дослідження більш складної геометрії.

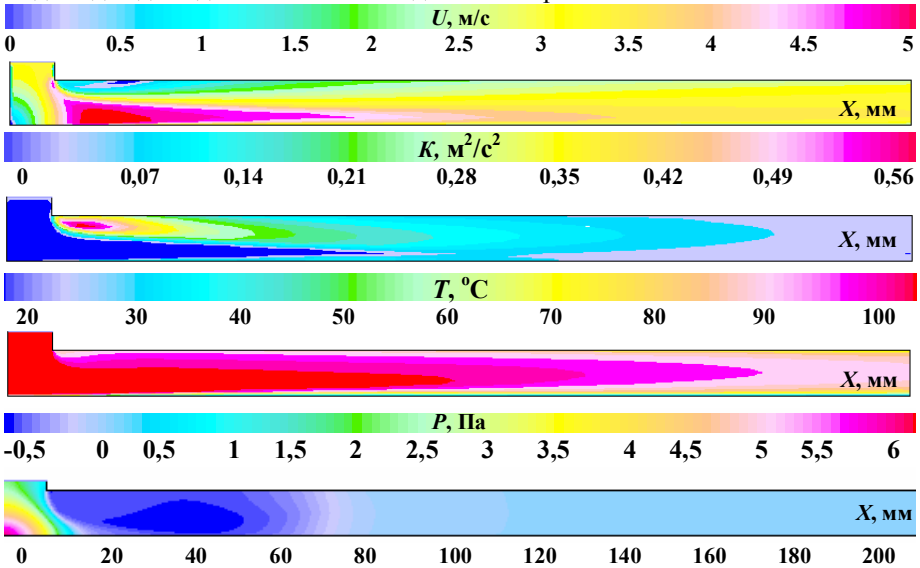


Рис. 5. Гідродинамічні і теплофізичні характеристики потоку в тривимірному неізотермічному каналі в кольоровій цифровій гамі при початковій швидкості $U_0 = 3$ м/с. Розподіли зверху вниз: швидкості в каналі; кінетичної енергії турбулентності; температури; статичного тиску

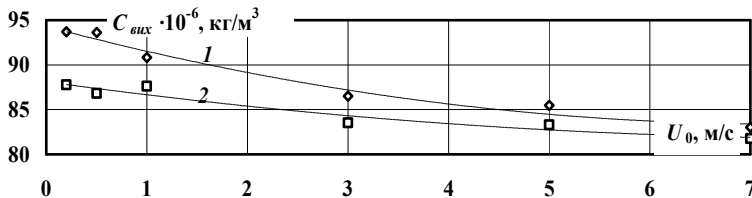


Рис. 6. Зміна концентрації дисперсної фази на виході з каналу залежно від початкової швидкості потоку та ступеня охолодження стінок: 1 – $\Delta T = 0^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ (розрахунок); $\diamond$, $\square$ (експеримент)

За допомогою методу голографічної інтерферометрії виконано дослідження структури газового потоку в неізотермічному каналі. За допомогою швидкісної кінозйомки 5 тисяч кадрів на секунду отримано інтерферограми, які відображають теплову та гідродинамічну картину потоку в каналі (рис. 7). Термогідрограми в достатній мірі збігаються з даними розрахунків полів температур і швидкостей потоку, що підтверджує прийняту теплофізичну модель процесу.

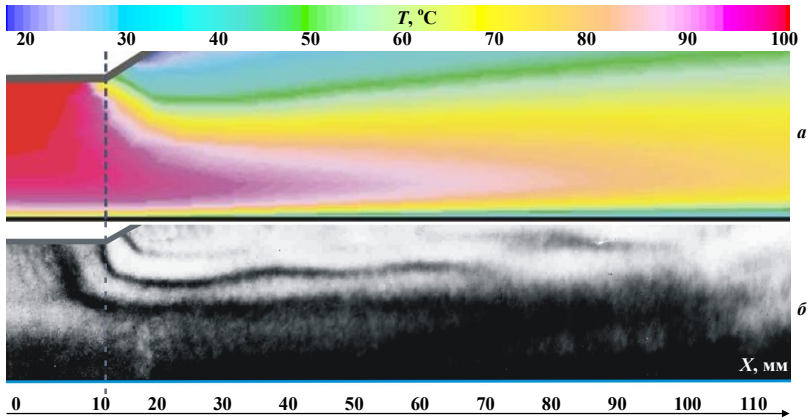


Рис. 7. Порівняння результатів розрахунку полів температур (а) з інтерферограмою (б) для випадку плоского каналу при $H = 10$ мм та початковій швидкості потоку 3 м/с

Четвертий розділ присвячено дослідженню характеристик дисперсного двофазного газового середовища в неізотермічному каналі з багаторядними сітковими коагуляторами. Виконано розрахунок осадження частинок у неізотермічному каналі з сітковим плоским коагулятором. Спочатку досліджувався коагулятор з 1, 10, 20, 30, 40 рядами плоских сіток. Розподіл векторів швидкості підтвердив наявність відривних циркуляційних зон, а температурного поля (рис. 8) показав, що сітки істотно впливають на охолодження потоку. Кінетична енергія (рис. 8) у міру проходження коагулятора зростає та стабілізується за 6 – м рядом сіток коагулятора.

Встановлено вплив швидкості потоку та перепаду температур на осадження частинок у неізотермічних умовах, що аналогічно випадку гладкого каналу. Ефект термофорезу в більшій мірі проявляється при швидкостях потоку менше 3 м/с. У порівнянні із гладким каналом використання сіткового 40 – рядного коагулятора підвищує ефективність уловлювання до 60...70 % (рис. 9) для частинок із концентрацією 100 мг/м^3 та дисперсною сполукою $d=1...3 \text{ мкм}$ замість 16...18 % для гладкого каналу. Паралельно з розрахунками були виконані експериментальні виміри осадження частинок у каналі з сітковим плоским коагулятором. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищила 6 %.

Досліджено осадження частинок у неізотермічному каналі з гофрованим сітковим коагулятором із протилежним нахилом гофрів у сусідніх смугах. При проходженні дисперсним двофазним газовим потоком сіток гофрованого коагулятора відбувається рівномірний розподіл потоку по всій його площі. Причому чим менший діаметр сітки, тим краще вирівнюється швидкість потоку (рис. 10).

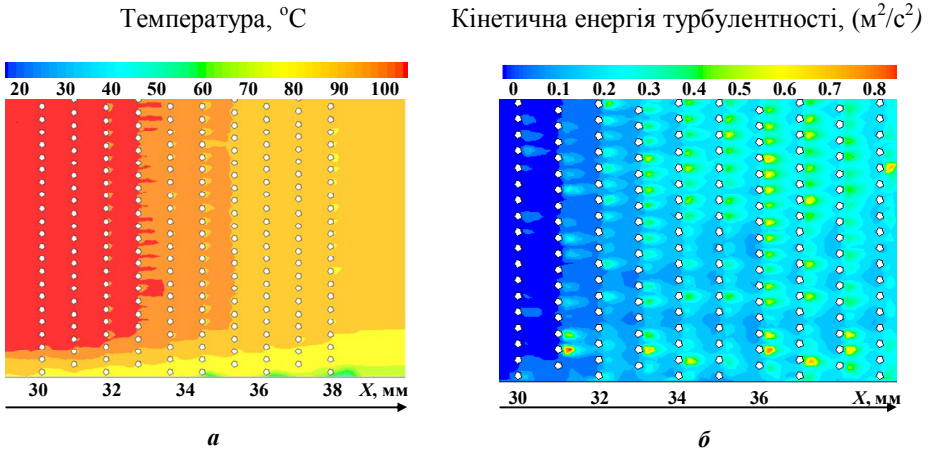


Рис. 8. Розподіл поля температур (*a*) та кінетичної енергії турбулентності (*б*) в нижній половині коагулятора з десятима рядів плоских сіток діаметром дроту 0,1 та 0,25 мм відповідно при швидкості $U_0 = 3$ м/с

Високий рівень інтенсивності турбулентності спостерігається по всій зоні коагулятора (рис. 10). Збільшення кількості рядів сіток сприяє генерації додаткової турбулентної енергії, що інтенсифікує перенос частинок. Аналіз впливу неізотермічності на гідродинамічні характеристики потоку в сітковому гофрованому коагуляторі показав, що розподіл основних гідродинамічних характеристик потоку – швидкості, інтенсивності турбулентності, кінетичної енергії турбулентності, статичного тиску – практично однакові для інтервалу перепаду температур 0...80 °С та швидкості потоку 0,5...7,0 м/с. Найбільший вплив перепаду температур (сил термофорезу) на рух частинок у гофрованому сітковому коагуляторі спостерігається при малих швидкостях, що аналогічно гладкому каналу та плоскому сітковому коагулятору.

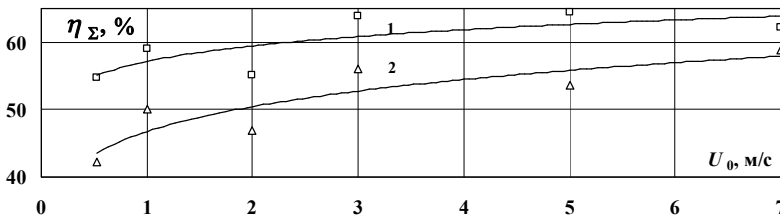


Рис. 9. Залежність коефіцієнта вловлювання в каналі із плоскою 40-рядною сіткою коагулятора діаметром дроту 0,1 мм від початкової швидкості потоку: 1 – $\Delta T = 80^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ розрахунок; Δ – $\Delta T = 0^\circ\text{C}$, $\square$ – $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ експеримент

При збільшенні швидкості потоку збільшується вплив інерційних і турбофоретичних сил, а ефект термофорезу знижується. Перепад температур при низьких швидкостях (менше 1 м/с) приводить до зниження вихідної концентрації при $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ в 1,5...2,0 рази порівняно з ізотермічними умовами.

При швидкостях 2...6 м/с цей ефект знижується і становить до 10...20 %. Порівняння розрахункових та експериментальних даних показали розбіжність значень до 6 %.

Виконано дослідження впливу неізотермічності на гідродинамічні характеристики потоку в кільцевому сітковому коагуляторі. У такому коагуляторі можна домогтися більшого зниження температури: з 100 °С до 30...40 °С, що збільшує термофоретичне осадження частинок (рис. 11).

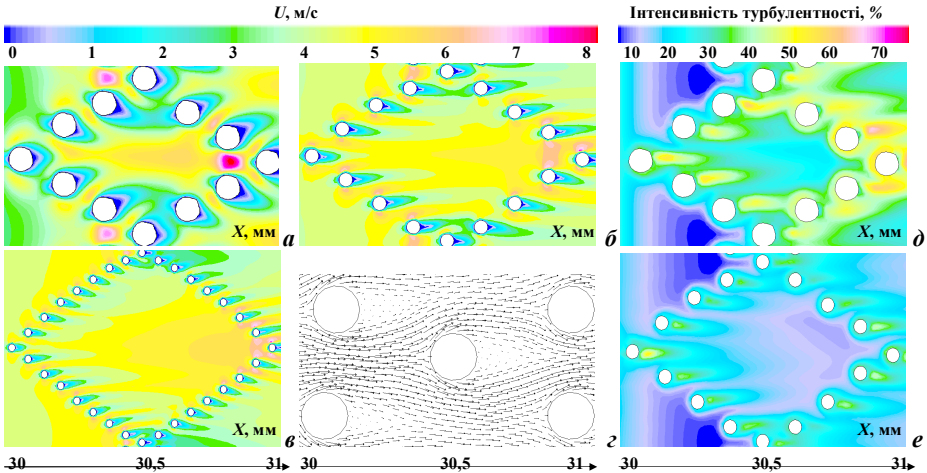


Рис. 10. Поля швидкості (а, б, в) та інтенсивності турбулентності (д, е) в елементі сіткового гофрованого коагулятора та векторів швидкості (з) у кольоровій цифровій гамі при $U_0 = 3$ м/с з діаметром дроту сітки: а, з, д – 0,5 мм; б, е – 0,25 мм; в – 0,1 мм

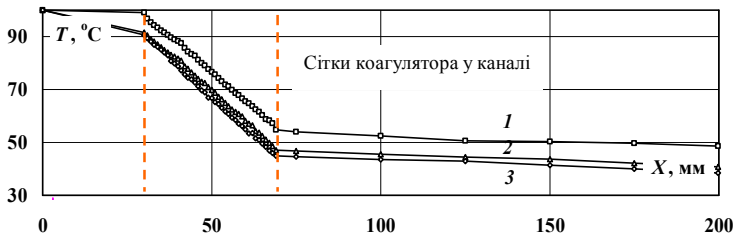


Рис. 11. Розподіл температурного поля в гофрованому сітковому коагуляторі з 40 – рядною сіткою діаметром дроту 0,1 мм при швидкості: $U_0 = 3$ м/с: 1 – центр каналу; 2, 3 – на відстані 1 мм від верхньої та нижньої стінок каналу

Досліджено осадження частинок у неізотермічному кільцевому гофрованому сітковому коагуляторі (рис. 12). При проходженні дисперсним двофазним потоком такого коагулятора відбувається рівномірний розподіл потоку по всій його площині. Такий характер аналогічний гофрованому плоскому коагулятору. Відмінністю є зниження швидкості потоку в коагуляторі через конфузорність каналу. Спад швидкості по перерізу коагулятора знижує

кінетичну енергію турбулентності, проте одночасно підвищується потенціал осадження за рахунок сил термофорезу.

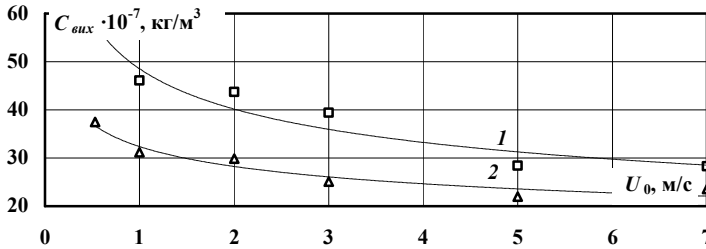


Рис. 12. Зміни концентрації дисперсної фази на виході з коагулятора з 40-рядною сіткою діаметром дроту 0,1 мм при різних швидкостях потоку та перепадах температур: 1 – $\Delta T = 0^\circ \text{C}$; 2 – $\Delta T = 80^\circ \text{C}$ розрахункові дані; $\square$, Δ – експериментальні дані

П'ятий розділ присвячено розробці та упровадженню пристроїв для очищення дисперсних двофазних газових середовищ від високодисперсних частинок для енергетичного устаткування. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено схему комплексної інтенсифікації термофоретичного осадження частинок у неізотермічних двофазних газорідних потоках (рис. 13).

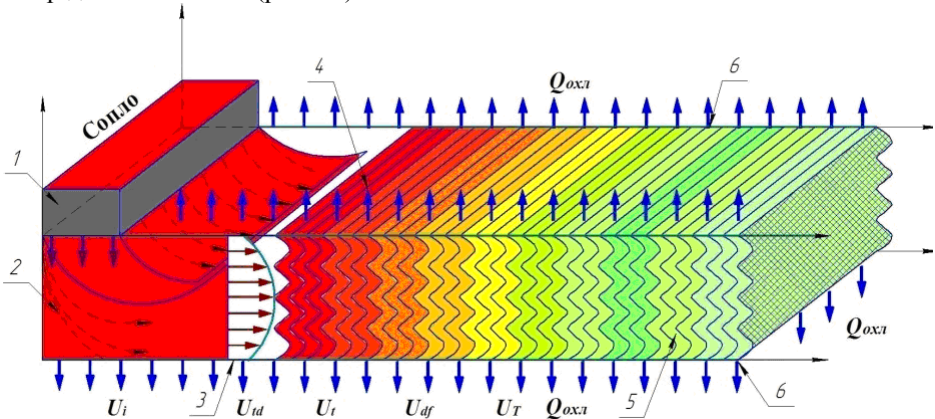


Рис. 13. Схема комплексної інтенсифікації термофоретичного переносу частинок у системі очищення: початкова ділянка струменя – сітковий неізотермічний коагулятор: 1 – сопло; 2 – потік двофазного дисперсного середовища; 3, 4 – верхня та нижня стінка каналу; 5 – сітковий гофрований коагулятор; 6 – охолодження стінок $Q_{охл}$; U_i – інерційне осадження грубодисперсних частинок у зоні удару та розвороту; U_T – термофоретичне осадження високодисперсних частинок; U_{df} – дифузіофоретичне осадження високодисперсних частинок; U_{td} – осадження під дією турбулентної дифузії високодисперсних частинок

На основі створеної технології розроблено базові екологічні та ресурсозберігаючі пристрої (рис. 14). У них перша стадія очищення збігається з системою очищення, в якій здійснюється вловлювання грубодисперсних

частинок за допомогою одно- або багатоструминневого обтікання пластин та високодисперсних частинок і пари у неізотермічних сіткових гофрованих коагуляторах. Для витрат газу менше 10...100 м³/годину рекомендується базовий очисник з кільцевим гофрованим неізотермічним коагулятором, а для витрат газу 100...10000 м³/годину – з плоским неізотермічним гофрованим коагулятором.

На основі створеного базового віддільника з неізотермічним сітковим кільцевим коагулятором розроблено багатосекційні газоочисні пристрої. На відміну від базової конструкції вони можуть мати від однієї до чотирьох секцій, залежно від вимог до ступеня очищення газів.

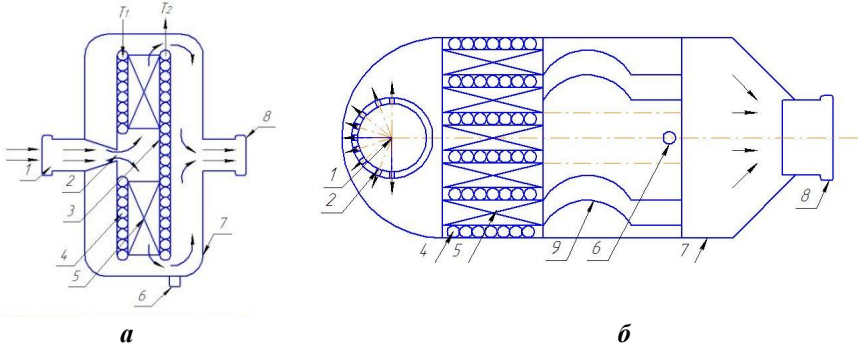


Рис. 14. Базові неізотермічні пристрої по очищенню дисперсних двофазних середовищ для екологічних та ресурсозберігаючих технологій: 1 – вхідний патрубок; 2 – сопло; 3 – пластина; 4 – теплообмінник; 5 – сітковий коагулятор; 6 – патрубок зливу; 7 – корпус; 8 – вихідний патрубок; 9 – пакет профілів: а – з циліндричним каналом; б – з плоским каналом

Виготовлено експериментальний зразок, та на спеціально розробленому стенді визначено коефіцієнти сумарної ефективності очищення з двома секціями сіткового коагулятора в неізотермічних умовах. Коефіцієнт сумарної ефективності очищення віддільника з двосекційним неізотермічним сітковим коагулятором при $C_{\text{вх}} = 250 \text{ мг/м}^3$ склав 99,9 % від рідких частинок, та до 60 % – від пари.

На основі створеного базового віддільника з неізотермічним сітковим плоским коагулятором розроблені газоочисні пристрої, які дозволяють працювати в інтервалах витрат дисперсного двофазного середовища 100...10000 м³/годину та концентрацією рідкої фази до 500 г/м³. Розроблено очисники дисперсних двофазних середовищ із неізотермічними сітковими коагуляторами та вугільними касетами, як з кільцевим, так і з плоским неізотермічним каналом.

Розроблено неізотермічний масловіддільник із сітковим плоским коагулятором для систем суфлювання газотурбінних двигунів 4-го покоління типу ДН 80 і ДГ 90 виробництва "Зоря-Машпроект", м. Миколаїв. Виготовлено експериментальний зразок, що пройшов випробування в складі ГТД ДГ 90 і ДН 80. Результати випробувань показали, що втрати масла через неізотермічний

масловіддільник у ГТД ДН 80 і ДГ 90 не перевищили 25 г/годину, що в тричотири рази нижче ніж у штатного масловіддільника. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено термофоретичний краплеуловлювач для випарювально-сушильних агрегатів продуктивністю 700...1500 м³/годину. Застосування конструкції неізотермічного краплеуловлювача дозволяє вловлювати частинки менше ніж 20 мкм, включаючи частинки конденсаційного походження й пари речовин. Також розроблено конструктивні механізми неізотермічних очисників з вугільною касетою, із проміжним підігрівом для систем кондиціонування повітря чистих приміщень, для системи вентиляції редуктора головних турбозубчатих агрегатів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Для дослідження процесів осадження частинок у неізотермічних турбулентних дисперсних двофазних газових середовищах розроблено теплофізичну модель, що складається з рівняння нерозривності, рівняння Нав'є–Стокса, транспортного рівняння для напруження Рейнольдса, рівняння збереження енергії, а також рівняння балансу сил при русі частки.

2. Створено: експериментальну установку та аеродинамічну робочу ділянку для досліджень неізотермічних течій двофазних середовищ методом голографічної інтерферометрії; експериментальну установку для дослідження процесів уловлювання частинок у неізотермічному дисперсному двофазному потоці; експериментальний стенд для дослідження базових конструкцій газоочисників.

3. Досліджено характеристики дисперсного двофазного газового потоку в неізотермічному гладкому циліндричному та плоскому каналах за допомогою узагальненої теплофізичної моделі. Отримано розподіл швидкості, статичного тиску, кінетичної енергії турбулентності, температури в циліндричному та плоскому каналах в області пристінної течії та у центрі каналу. Виконано розрахунок осадження частинок у каналі. Підвищення перепаду температур до 10...80 °С збільшує ефект осадження частинок у півтора рази. Розбіжність результатів розрахунків та експериментів не перевищила 5 %.

4. Виконано візуалізацію газового потоку в каналі та отримано кінограми термогідрограм (інтерферограм), які адекватно відображають теплову та гідродинамічну обстановку газового потоку.

5. Виконано розрахунок та проведено експериментальні вимірювання осадження частинок у неізотермічному каналі із сітковим плоским коагулятором. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищила 6 %.

6. Досліджено гідродинамічні характеристики потоку та осадження частинок у неізотермічному каналі з гофрованим сітковим коагулятором. Показано, що розподіл основних гідродинамічних характеристик потоку практично однаковий для інтервалу перепаду температур 0...80 °С і швидкості потоку 0,5...7 м/с. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищила 6 %.

7. Досліджено осадження частинок у неізотермічному кільцевому гофрованому сітковому коагуляторі. Коефіцієнт уловлювання для кільцевого коагулятора досягає 90 % та перевищує показники плоского каналу. Збільшення осадження за рахунок сил термофорезу становить до 30 % при вхідних швидкостях до 15 м/с.

8. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено схему комплексної інтенсифікації термофоретичного осадження частинок у неізотермічних двофазних газорідинних потоках, що зводиться до використання: температурного потенціалу дисперсних двофазних середовищ для осадження частинок; створення градієнтів температур у пристінних областях, на поверхні каналів та в об'ємі потоку; генерації турбулентних пульсацій неізотермічними коагуляторами.

9. На основі створеної технології розроблено базові екологічні та ресурсозберігаючі пристрої. Для витрат газу менше 10...100 м³/годину рекомендується базовий очисник з кільцевим гофрованим неізотермічним коагулятором, а для витрат газу 100...10000 м³/годину – очисник з плоским неізотермічним гофрованим коагулятором.

10. Використання розроблених конструкцій очисників у системах суфлювання реальних ГТД ДН 80 і ДГ 90 показали, що коефіцієнт вловлювання досягає 99,9%, а втрати масла не перевищують 25 г/годину, що в 4 рази нижче ніж у штатному масловіддільнику. Економічна ефективність від впровадження маслоуловлювача на один ГТД становить 11 тис. грн. у рік.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Долинский А.А., Рыжков С.С., Гартвиг А.П.* Разработка термофоретического каплеуловителя для испарительно-сушильных агрегатов // Промышленная теплотехника. – 2006. Т. 28, № 6. – С.49-55.
2. *Басок Б.И., Рыжков С.С.* Исследование влияния неізотермичности плоского канала на характеристики дисперсного двухфазного потока // Промышленная теплотехника. – 2006. Т. 28, № 5. – С.15-20.
3. *Басок Б.И., Рыжков С.С.* Экспериментальная установка для исследования процессов утилизации дисперсных частиц в двухфазном потоке // Промышленная теплотехника. – 2006. Т. 28, № 4. – С.17-22.
4. *Басок Б.И., Рыжков С.С., Авраменко А.А.* Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале // Промышленная теплотехника. – 2006. Т. 28, № 3. – С.14-19.
5. *Басок Б.И., Рыжков С.С.* Исследование характеристик дисперсного двухфазного потока в неізотермическом плоском сеточном коагуляторе // Экотехнологии и Ресурсосбережение. – 2006. № 3. – С. 69 – 72.
6. *Рыжков С.С.* Разработка и исследование неізотермического газоочистителя для улавливания высокодисперсных аэрозолей в энергетическом оборудовании // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2006. – № 3(408). – С. 127–135.
7. *Рыжков С.С.* Исследование влияния перепада температур в

сепарирующих элементах на эффективность очистки газовых сред // Промышленная теплотехника: Междунар. науч.–прикл. журн. –2004. Т. 26, №6. – С. 70–75.

8. Басок Б.И., Рыжков С.С. Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании // Промышленная теплотехника. –2003. Т. 25, № 5. – С. 45–50.

9. Басок Б.И., Рыжков С.С. Установка для визуализации течений методом голографической интерферометрии // Промышленная теплотехника. –2003. Т. 25, № 4. –С. 284–287.

10. Басок Б.И., Рыжков С.С. Применение когенерационных технологий для очистки дисперсных двухфазных сред энергетического оборудования // Тез. докл. 1-й Междунар. конф. "Когенерация в промышленности и коммунальной энергетике" – К., 2004. – С. 71–72.

11. Рыжков С.С. Термофоретическая очистка воздуха от вредных аэрозолей // Тез. докл. междунар. науч.–технич. конф. "Экологическая безопасность объектов хозяйственной деятельности" – Николаев, 2004. – С. 76–78.

12. Рыжков С.С. Расчет влияния перепада температур на улавливание высокодисперсных частиц в осесимметричном канале // Тез. докл. 4-й междунар. науч.–технич. конф. "Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении" – Николаев, 2005. – С. 271–272.

13. Рыжков С.С. Расчет влияния перепада температур на осаждение высокодисперсных частиц на основе транспортного уравнения Рейнольдса // Тези доповідей міжнар. наук.–техн. конф. студ., асп., молодих учених та молодих спеціалістів "Суднова енергетика: стан та проблеми" – Миколаїв, 2005. – С. 122–123.

14. Рыжков С.С. Влияние температуры на улавливание высокодисперсных частиц в гладком канале // Тез. докл. 4-й междунар. конф. "Проблемы промышленной теплотехники" – К., 2005. – С. 190–191.

15. Рыжков С.С. Экспериментальная установка для исследования влияния перепада температур на осаждение частиц // Тез. докл. 4-й междунар. конф. "Проблемы промышленной теплотехники" – К., 2005. – С. 191–192.

АНОТАЦІЯ

РИЖКОВ С. С. Термофоретичне осадження рідких частинок турбулентного газового потоку.

Рукопис. Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" / Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України – Київ, 2007.

Мета роботи полягає у розробці методів інтенсифікації термофоретичного осадження рідких високодисперсних частинок у процесі очищення газового потоку та у створенні на базі отриманих результатів малогабаритних високоефективних термофоретичних очисників.

Наукове значення роботи полягає в можливості використання розробленої теплофізичної моделі для розрахунків характеристик дисперсних двофазних середовищ, а отриманих результатів – для створення екологічних та ресурсозберігаючих технологій у різних галузях народного господарства.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в розробці базових екологічних та ресурсозберігаючих пристроїв для очищення дисперсних двофазних газових середовищ із неізотермічними сітковими коагуляторами для різних витрат газу та вимог очищення; малогабаритних високоефективних термофоретичних масловіддільників для систем суфлювання ГТД ДГ 90 і ДН 80; високоефективних віддільників для систем технічного кондиціонування повітря; каплевловлювачів для випарно-сушильних агрегатів.

Ключові слова: термофоретичні сили, неізотермічні коагулятори, ефективність очищення, каплеуловлювачі.

АННОТАЦИЯ

РЫЖКОВ С. С. Термофоретическое осаждение жидких частиц турбулентного газового потока

Рукопись. Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 "Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика" / Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины – Киев, 2007.

Цель работы состоит в разработке методов интенсификации термофоретического осаждения жидких высокодисперсных частиц в процессе очистки газового потока и в создании на базе полученных результатов малогабаритных высокоэффективных термофоретических очистителей.

Исследование процессов очистки дисперсных двухфазных газовых сред проводилось теоретическими методами – путем разработки теплофизической модели и ее расчета, и экспериментальными – голографической интерферометрией в реальном времени, оптическими измерениями дисперсности и концентрации фаз. Решение дифференциальных уравнений теплофизической модели производилось на основе программного продукта Fluent.

Теоретически и экспериментально исследованы характеристики дисперсного двухфазного газового потока в неізотермічному гладкому циліндричному і плоскому каналах, отримано розподілення швидкості, статического тиску, кінетическої енергії турбулентності, полів температур і виконан розрахунок осадження частинок в інтервалі перепаду температур (20...80 °C); швидкостей (1...25 м/с) і висот каналу (5...30 мм) при концентрації дисперсної фази до 100 мг/м³ со середнім діаметром частинок від 1 до 3 мкм.

Виконана візуалізація течія в каналі з допомогою методу голографіческої ітерферометрії і отримані при допомозі швидкісної фотозйомки кінограмми інтерферограмм (термогідрограмм), которые отражают искомую тепловую и гидродинамическую обстановку потока в канале.

На основе теплофизической модели исследованы гидродинамические характеристики турбулентного дисперсного двухфазного газового потока в неизотермическом цилиндрическом и плоском каналах с сеточными коагуляторами и выполнен расчет осаждения частиц для коагуляторов с 1, 10, 20, 30, 40 рядами сеток.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана схема комплексной интенсификации термофоретического осаждения частиц в неизотермических двухфазных газовых потоках и рациональная технологическая последовательность термофоретической очистки дисперсных двухфазных газовых сред, реализованная в базовых конструкциях газоочистителей.

Практическое значение полученных результатов работы состоит в разработке базовых экологических и ресурсосберегающих устройств для очистки дисперсных двухфазных газовых сред с неизотермическими сеточными коагуляторами для различных расходов газа и требований к степени очистки; малогабаритных высокоэффективных термофоретических маслоотделителей для систем суфлирования ГТД ДГ 90 и ДН 80; высокоэффективных отделителей для систем технического кондиционирования воздуха; каплеуловителей для испарительно-сушильных агрегатов.

Ключевые слова: термофоретические силы, неизотермические коагуляторы, эффективность очистки, каплеуловители.

ANNOTATION

RYZHKOV S. S. Thermophoretic liquid particles sedimentation of turbulent gas stream.

Manuscript. Thesis for a Degree of "Candidate of Technical Science". Specialty 05.14.06 „Engineering thermal and industrial heat power engineering. The Institute of Engineering Thermal Physics of National Academy of Science of Ukraine, Kiev 2007.

The purpose of the work consists in the development of thermophoretic intensification of high disperse liquid particles sedimentation in the gas cleaning process of and in the creation of small high-performance thermophoretic purifiers on the base of the received results.

The scientific value of the work consists in the possibility of the development of the thermophoretical model for the calculations of dispersible biphasic gas flow, and in the creation of ecological and resource-saving technologies for different branches of industry.

The practical value of obtained results consists in the development of:

- ecological and resource-saving technologies for the cleaning of the dispersible biphasic stream;
- small high-performance thermophoretic purifiers for the breathing systems for gas-turbine unit ДГ 90 and ДН 80;
- high-efficiency separators for the technical conditioning systems;
- purifiers for the evaporator installation.

Keywords: thermophoretic force, unisothermal coagulators, efficiency of cleaning, purifiers.

Підписано до друку 12.02.2007 р. Формат 60х84/16.

Папір офсетний. Формат видання 148х210 мм.

Тираж 125. Замовл. 163.

Поліграфічне підприємство ТОВ „Контур-Т”
03057, м. Київ, вул. Желябова, 2-а