

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140609>

УДК 620.9

P 93

**PROBLEMS OF CLEANING INTENSIFICATION IN MULTIPHASE DISPERSE MEDIA OF POWER PLANTS AND MEANS OF THEIR SOLUTION
(PART 2)**

**ПРОБЛЕМИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ОЧИСТКИ В БАГАТОФАЗНИХ ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК І СПОСОБИ ЇХ ВИРІШЕННЯ
(частина 2)**

Sergiy Ryzhkov

sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2201-6172

С. С. Рижков,

канд. техн. наук, доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. In the second part of the article the experimental methods of the cleaning processes intensification in the multiphase disperse media of the power plants have been considered. The reliability of the results of the study is proved by means of the error assessment and the verification of the obtained data. The results of the study of the ultraphoretic particle deposition in the process of the cleaning of the disperse two-phase gas media in the highly turbulent channels are given. They enabled the development of the scheme of the complex intensification of the ultraturbophoretic particle transport in the cleaning system: «initial section of the jet – lattice ultraturbophoretic coagulator». The principles of the intensification of the ultraturbophoretic transport and deposition of the fine particles are proved. The objectives for the study of the scheme of the complex intensification of the ultraturbophoretic particle transport are set within the combined problem (the internal problem and the external problem). The unstructured lattice technology for the theoretical calculations of the pulsating ultrasonic particle deposition in the universal lattice coagulator is suggested and implemented. The developed method with the ultraturbophoretic stage enables covering a wide range of devices which carry out the cleaning processes for the systems such as the gas-liquid, gas-solid (for this the faulting multiflow stage is considered), compressed gas-liquid (for this the additional calculations of the structural strength are performed under the same cleaning work processes) systems.

Keywords: method; model; assessment; error; reliability.

Анотація. Наведено експериментальні методи дослідження інтенсифікації процесів очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок. Обґрунтовано достовірність результатів дослідження шляхом оцінки похибки і верифікації отриманих даних.

Ключові слова: метод; модель; оцінка; похибка; достовірність.

Аннотация. Приведены экспериментальные методы исследования интенсификации процессов очистки в многофазных дисперсных средах энергетических установок. Обоснована достоверность результатов исследования путем оценки погрешности и верификации данных.

Ключевые слова: метод; модель; оценка; погрешность; достоверность.

REFERENCES

- [1] Basok B.I., Ryzhkov S.S., Ryzhkov R.S., Bortsov O.S. Intensyfikatsiia osadzhennia ridkoi fazy u separatorakh bahatofaznykh sumishei palyv pidvyshchenoho tysku [Intensification of the liquid phase deposition in separators of multiphase fuel mixtures of high pressure]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 22–28.
- [2] Ryzhkov S.S. Problemy intensyfikatsii ochystky v bahatofaznykh dyspersnykh seredovyshchakh enerhetychnykh ustanovok i sposoby yikh vyrishennia Chastyna 1 [Problems of cleaning intensification in multiphase disperse media of power plants and means of their solution. Part 1]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia – Collection of Scientific Publications of NUS*, 2014, no. 5, issue 455, pp. 51–58.
- [3] Ryzhkov S.S. Uzahalnena matematychna model vyznachennia intensyvnosti protsesu ochystky dyspersnykh bahatofaznykh potokiv u systemakh enerhetychnykh ustanovok [Generalized mathematical model of

determination of the intensity of cleaning process of dispersed multiphase flows in power plants systems]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia – Collection of Scientific Publications of NUS*, 2014, no. 3, issue 453, pp. 69–76.

- [4] Ryzhkov S.S. Vliyanie termoforeticheskikh effektov na protsess ulavlivaniya vysokodispersnykh chastits v trubchatom separatore [Impact of thermophoretic effects on the process of highly dispersed particles capture in the tubular separator]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 88–28.
- [5] Ryzhkov S.S., Pastukhov S.Yu. Chislennoe modelirovanie osazhdeniya vysokodispersnykh chastits v protochnoy chasti separatsionnogo oborudovaniya [Numerical simulation of deposition of highly dispersed particles in the flow part of the separation equipment]. *Elektronne vydannia «Visnyk Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia»* [NUS Journal. Electronic Edition], 2010, no. 3. Available at: <http://www.ev@nuos.edu.ua>.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вирішення завдань з інтенсифікації процесів очистки при розподілі фаз у багатофазних потоках виконувалося теоретичними та експериментальними методами, більшість з яких відноситься до математичного і фізичного моделювання. До перших належать методи, в яких, як правило, використовуються транспортне рівняння напружень Рейнольдса, аналогії Рейнольдса переносу теплоти і маси до переносу імпульсу, нерозривності, рівняння динаміки балансу сил при русі частинки, а також умов однозначності – геометричних, фізичних, початкових і граничних [1–5]. У методах фізичного моделювання і натурних випробуваннях застосовуються способи неконтактного вимірювання. В сукупності методи моделювання дають змогу дослідити такі способи сепарації, як інерційний, турбо-, дифузійно-термофоретичний.

За результатами розрахунків, наведених у [5], використання пульсацій дозволяє збільшити значення коефіцієнта уловлювання високодисперсних частинок у порівнянні з режимами течії без пульсацій. У той же час для обґрунтування достовірності цих результатів потрібно провести додаткові експериментальні дослідження і верифікацію отриманих даних.

МЕТА СТАТТІ – обґрунтування достовірності даних по збільшенню значення коефіцієнта уловлювання високодисперсних частинок при використанні пульсацій у порівнянні з режимами течії без пульсацій.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При дослідженні процесів ультратурбофоретичного переносу і його головних характеристик методом фізичного моделювання в експериментальних пристроях застосовувались неконтактні методи вимірювання в одно- та двофазних середовищах в ізотермічних умовах і при наявності теплообміну: голографічна інтерферометрія, поверхнева індикація потоку, швидкісна фотозйомка, оптичні вимірювання дисперсності та концентрації частинок.

При інтенсифікації переносу частинок у багатофазних середовищах важливо знати розподіл поля температур у газовому потоці в елементах сепараційного устаткування. Задача експериментального визначення температурного поля в цих умовах полягає у вимірюванні температур із просторовою дискретністю 0,1 мм, що виключає можливість застосування термопар. Крім того, внесення термопар у досліджувану область призводить до викривлення потоку і значного впливу на рух частинок розміром менше 10 мкм. Використання оптичних методів для визначення тривимірного температурного поля ускладнене, тому фізичне моделювання базувалося на дослідженні двовимірних температурних полів, де ламінарний газовий потік з температурою 100...200 °С рухався зі швидкістю 0,3...10 м/с перпендикулярно до площини елемента сепарації. Поверхні сітки у каналі охолоджувались до 20 °С. Така конструкція дозволяла одержати в потоці двовимірне температурне поле, що не мало градієнта в напрямку елементів сітки, і застосувати для визначення температур інтерферометричний метод.

Якщо між тілом обтікання та газом існує різниця температур, то в газовому потоці виникає неоднорідне температурне поле, яке при малих швидкостях потоку однозначно пов'язане з полем розподілу густини газу і його показником заломлення. Таким чином, вважаючи тиск P при малих швидкостях потоку постійним, зміна температури ΔT від зміни показника заломлення Δn має вигляд

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

де k – стала Гладстона–Дейла; μ – молярна маса; R – універсальна газова стала.

Визначення Δn проведено за допомогою інтерферометра, вважаючи, що його зондувальні промені поширюються по ізотермічних прямих лініях, уздовж яких значення n не змінюється. На інтерферограмі максимуми освітленості відносилися до областей, де різниця ходу ΔL дорівнює цілому числу N довжин

хвиль випромінювання λ . Тоді

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

Якщо $k = 0,226 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, $P = 1,03 \cdot 10^5$ Па, $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $R = 8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$, $n - 1 = 2,92 \cdot 10^{-4}$, $L = 5 \cdot 10^{-2}$ м, то одна інтерференційна смуга дорівнює 11 °С. Обробка інтерферограм виконувалася за допомогою програмного комплексу.

У газових потоках при числах Прандтля, близьких до одиниці, спостерігається аналогія між гідродинамічними та тепловими пристінними шарами. В цьому випадку за характеристиками температурного пристінного шару можна робити висновки про гідродинамічний пристінний шар. Температурне поле в шарі при $p = \text{const}$ однозначно характеризує як розподіл густини газу в ньому, так і зміну показника заломлення. Тому залежність зміни температури від номера інтерференційної смуги можна використовувати для дослідження гідродинамічних шарів на неізотермічній поверхні методом голографічної інтерферометрії. На цій основі розроблено метод, що дозволяє візуалізувати і документувати за допомогою швидкісної кінозйомки в реальному часі процеси в потоках і пристінних шарах, відривних потоків та сіткових коагуляторах.

Дослідження процесів переносу високодисперсної фази за рахунок ультразвукових та турбофоретичних сил у двофазних газових середовищах виконувалися на дослідницьких стендах.

Оптичні виміри дисперсності й концентрації частинок проводилися за допомогою фотоелектричного лічильника аерозольних частинок АЗ-5 і фотометра аерозолів ФАНУ4.2. Похибка виміру цими приладами не перевищувала 5 %. Відбір проб проводився через забірні трубки, що служили одночасно зондами повного тиску. При вимірах дотримувалися умови ізокінетичності. Масова концентрація частинок у потоці визначалася відбором проби дисперсного двофазного середовища аспіратором і пропусканням її через аналітичні фільтри АФА. Фільтри АФА зважувалися на аналітичних вагах з похибкою $\pm 0,5$ мг до і після взяття проби. По приросту ваги фільтра з урахуванням часу й витрати проби газу визначалася концентрація частинок за формулою

$$C = 1000(m_{\text{вх}} - m_{\text{вих}}) / G_g \tau.$$

Витрата газового середовища визначалася за перепадом тисків на витратомірних колекторах, виконаних у вигляді профілю лемніскаг:

$$G_g = \alpha_K S_K \sqrt{2/\rho \cdot 9,81(p_1 - p_2)},$$

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 визначалася за формулою

$$\eta_{\Sigma} = (1 - C_{\text{вих}} / C_{\text{вх}}) \cdot 100 \%$$

Коефіцієнт фракційної ефективності очищення визначався за допомогою лічильника аерозольних частинок АЗ-5 за формулою

$$\eta_i = (1 - Ni_{\text{вих}} / Ni_{\text{вх}}) \cdot 100 \%$$

Аеродинамічний опір елемента сепарації визначався за перепадом тисків на вході $p_{\text{вх}}$ і виході $p_{\text{вих}}$ з робочої ділянки за допомогою манометра і трубок повного тиску за формулою

$$\Delta p = p_{\text{вих}} - p_{\text{вх}}.$$

Швидкість осадження частинок на поверхні за рахунок спільної дії всіх сил

$$U_{TT} = q_x / C_{\text{вх}} = C_{\text{ул}} G_g / S_K C_{\text{вх}}.$$

Для визначення швидкості осадження крапель за рахунок ультраефектів U_{TT} визначалися швидкості відповідно із звуковим впливом на канал U_{0d} і без нього U_d . Різниця між ними виражає середню швидкість осадження за рахунок ультраефекту:

$$U_{\infty} = U_d^0 - U_d.$$

У процесі експериментальних досліджень здійснювалися як прямі, так і непрямі вимірювання. Вибрані методи вимірювання дозволяли врахувати 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 становила 0,5 мг. Перепад тисків на чашкових манометрах визначався з абсолютною похибкою 0,02 мм вод. ст.; мікроманометрах типу МКВ – 0,01 мм вод. ст.; U-подібному манометру – 0,5 мм вод. ст. Відносна похибка визначення розрахункового числа частинок фотоелектричним лічильником АЗ-5 і фотометром аерозолів ФАНУ4.2 становила 5 %.

Похибка непрямих вимірювань залежить від точності прямих вимірювань та виду функціональної залежності. Числові значення середньої квадратичної похибки

$$\sigma_y = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_m} \right)^2 \sigma_m^2 \right]},$$

де $\left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)$ – частинна похідна функціональної залежності непрямого вимірювання по $X_i (i = 1 \dots m)$; σ_i – середня квадратична похибка результату вимірювання величини X_i .

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

Експериментальні дослідження виконані на стенді по вивченню турбулентних течій методом голографічної інтерферометрії (рис. 1). Досліджуваний коагулятор уведено в аеродинамічну робочу

ділянку експериментальної установки за відривною зоною і розбито на шари (ряди) сітки – від 2 до 20, перед і за вихідним перерізом яких проводилися вимірювання складових швидкості і знімалися кінограми інтерферограм на швидкісній кінокамері. Потім отримані дані для підтвердження фізичної моделі гідродинамічної обстановки розглядалися спільно з отриманими розрахунковими значеннями. Коагулятори виготовлялися з тканинних сіток з квадратними вічками за ГОСТ 3826–82. У досліджах використовувалися сітки з номерами 0,5; 0,25; 0,1; 0,009; 0,004, з розмірами вічок $0,5 \times 0,5$ мм і діаметром дроту 0,5 мм; $0,25 \times 0,25$ і $d_{др} = 0,25$ мм і т. д.

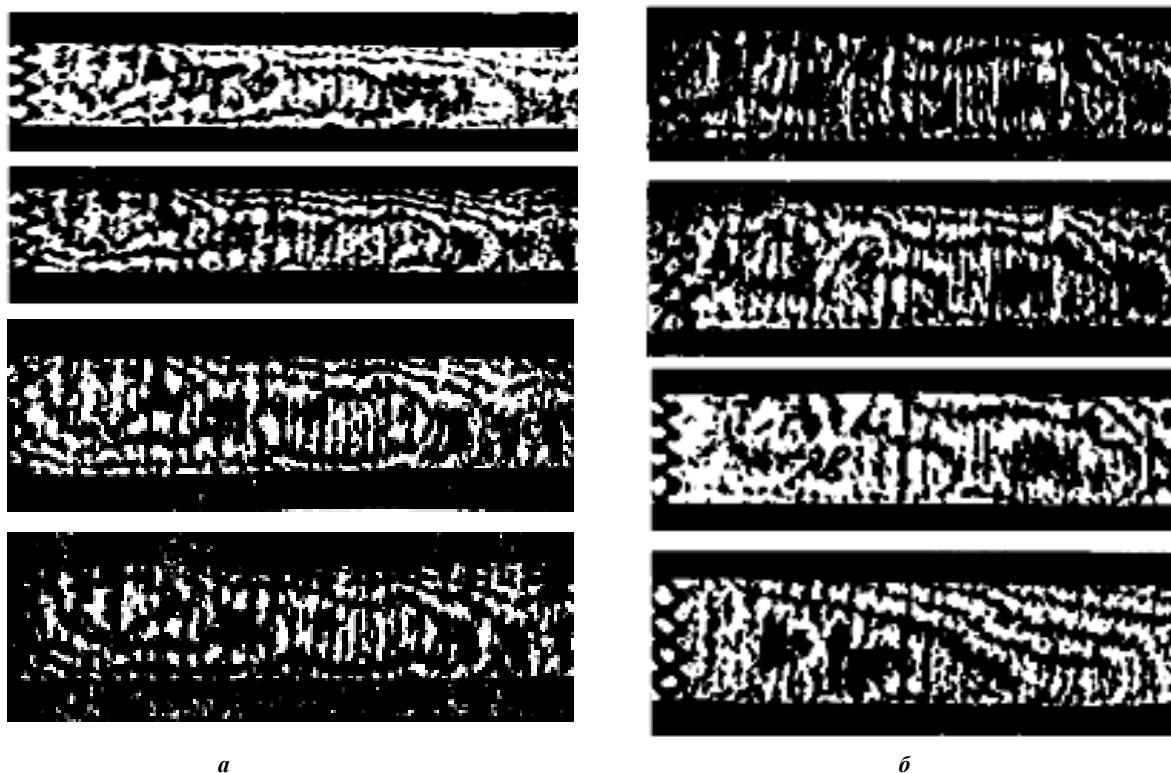


Рис. 1. Кінограми інтерферограм гідродинамічного стану за другим рядом коагулятора з сіток № 0,25 (а) та № 0,5 (б)

Примітною є висока турбулентність потоку, яка обумовлена наявністю відривної зони вверх по потоку. Ступінь локальної турбулентності не опускався нижче 15...20 % у всьому інтервалі зміни швидкості.

Профілі швидкості після дворядного коагулятора істотно вирівнюються по висоті, аналогічний характер має розподіл турбулентності. Це свідчить про її генерацію в об'ємі коагулятора. Помітне вирівнювання профілів швидкості і пульсацій спостерігається у сіток з більш дрібними вічками. Інтерференційні смуги за коагулятором заповнюють весь переріз каналу та відображають профіль швидкісного потоку.

У той же час біля сітки № 0,5 вирівнювання профілю швидкості спостерігається в найменшій мірі; на кадрах видно струминець над пластиною і зону циркуляції. Гофровані сітки генерують мікротовихрові об'єми, які зливаються один з одним і можуть утворювати великі вихори. Збільшення швидкості струменя призводить до вирівнювання профілю по всьому перерізу каналу, локальний ступінь турбулентності може зменшитися, але це не означає зниження енергії турбулентного руху.

Аналогічний профіль потоку спостерігається і за двадцятим рядом коагулятора. На кожній інтерференційній смугі видно дрібні точкові вихори,

що свідчить про їх генерації коагулятором. Підвищений рівень турбулентності по рядах і по висоті коагулятора створює сприятливу обстановку для турбофоретичного перенесення частинок на поверхню сіток.

Здійснено експериментальні дослідження ультразвукового сепаратора при $G_b = 90 \dots 200 \text{ м}^3/\text{год}$; $C_{\text{вх}}$ до $500 \text{ мг}/\text{м}^3$ (рис. 2–4). Такий інтервал подачі газу

забезпечує ефективну роботу при різних режимах навантаження енергообладнання – від номінального до 10 % навантаження. Досліджено сумарний коефіцієнт уловлювання та вихідної концентрації. Показано, що за рахунок ультразвукового ефекту при частоті звукових коливань 10 кГц надбавка до ефективності очистки досягає 20 %, що підтверджує теоретичні розрахунки.

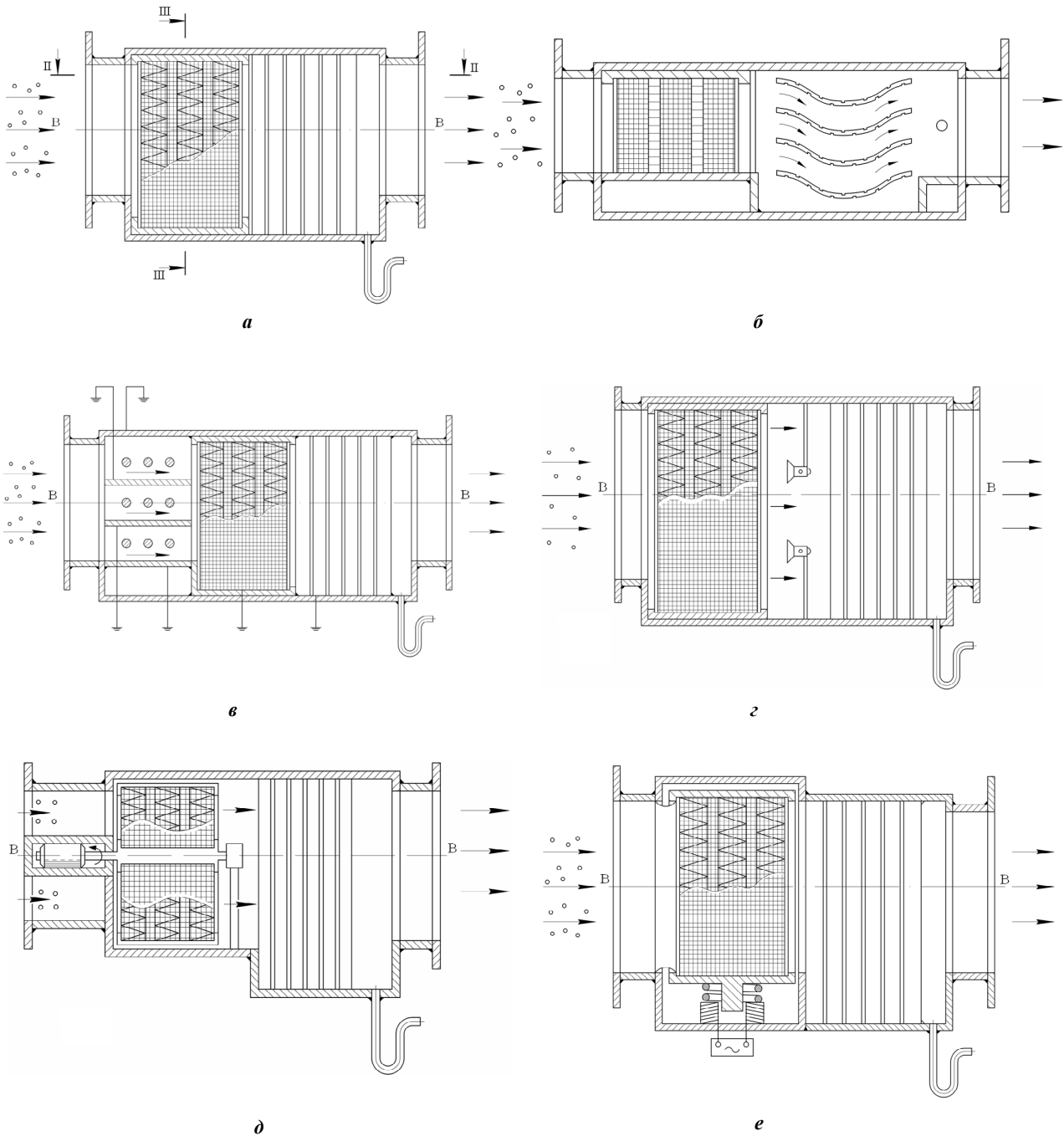


Рис. 2. Схема ультратурбофоретичного сепаратора: а – вигляд збоку; б – вигляд зверху; в, г, д, е – підключення пульсаційного елемента

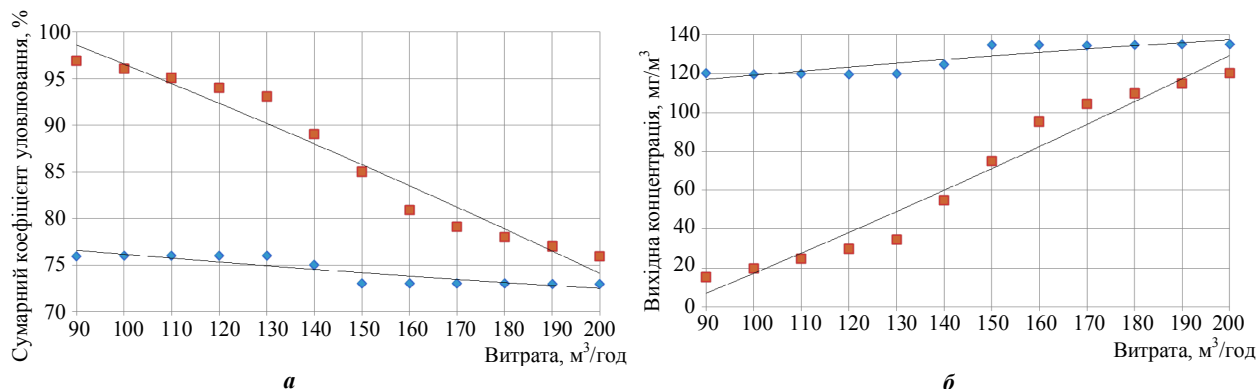


Рис. 3. Експериментальні дослідження ультразвукового сепаратора при $G_b = 90 \dots 200 \text{ м}^3/\text{год}$; $C_{\text{вх}} = 500 \text{ мг}/\text{м}^3$: *а* – сумарний коефіцієнт уловлювання; *б* – вихідна концентрація; \blacklozenge – без пульсацій; \blacksquare – з пульсаціями

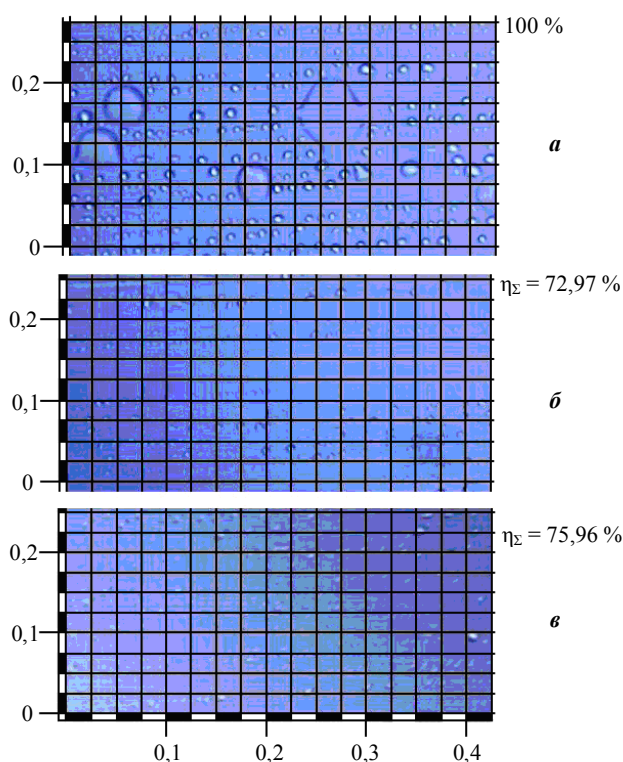


Рис. 4. Дисперсний склад газового середовища при $G_b = 200 \text{ м}^3/\text{год}$; $C_{\text{вх}} = 500 \text{ мг}/\text{м}^3$: *а* – вхід ультразвукового сепаратора; *б* – вихід при $v = 0 \text{ кПа}$; *в* – вихід при $v = 10 \text{ кПа}$

ВИСНОВКИ

1. Наведено результати дослідження ультрафоретичного осадження частинок у процесі очищення дисперсних двофазних газових середовищ у високо-

турбулентних каналах, що дозволило розробити схему комплексної інтенсифікації ультратурбофоретичного переносу частинок у системі очищення: «початкова ділянка струменя – сітковий ультратурбофоретичний коагулятор».

2. Обґрунтовано принципи інтенсифікації ультратурбофоретичного переносу та осадження високодисперсних частинок, які зводяться:

до використання енергетичного потенціалу дисперсних двофазних середовищ для осадження частинок;

до створення градієнтів акустичних коливань у пристінних областях на поверхні каналів і в об'ємі потоку;

генерації турбулентних пульсацій тілами осадження багатофункціонального призначення.

3. Установлено, що поперечні пульсації значно збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлювання мікрочастинок у діапазоні швидкостей потоку $0,5 \dots 1,0 \text{ м}/\text{с}$ при збільшенні поверхні осадження (кількості рядів коагулятора) – від 20 до 60 %. При збільшенні швидкості потоку більше $10 \text{ м}/\text{с}$ пульсаційний ефект нівелюється, що потрібно враховувати при створенні сепаруючого обладнання. Рекомендований діапазон швидкостей газу для спільної дії звукових пульсацій та турбофорезу – $0,5 \dots 5,0 \text{ м}/\text{с}$.

4. Досліджено вплив неізотермічності на гідродинамічні характеристики потоку в кільцевому сітковому коагуляторі. У такому коагуляторі можна досягти більшого зниження температури – від 100 до $30 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$, що збільшує термофоретичне осадження частинок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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. – 2014. – Т. 36, № 2. – С. 22–28.
- [2] Рижков, С. С. Проблеми інтенсифікації очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок і способи їх вирішення (частина 1) [Текст] / С. С. Рижков // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2014. – № 5 (455). – С. 51–58.

- [3] **Рижков, С. С.** Узагальнена математична модель визначення інтенсивності процесу очистки дисперсних багатофазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / С. С. Рижков // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2014. – № 3 (453). – С. 69–76.
- [4] **Рыжков, С. С.** Влияние термофоретических эффектов на процесс улавливания высокодисперсных частиц в трубчатом сепараторе [Текст] / С. С. Рижков // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 4. – С. 18–28.
- [5] **Рыжков, С. С.** Численное моделирование осаждения высокодисперсных частиц в проточной части сепарационного оборудования [Электронный ресурс] / С. С. Рыжков, С. Ю. Пастухов // Електронне видання «Вісник НУК». – Миколаїв : НУК, 2010. – № 3. – Режим доступа: <http://www.ev@nuos.edu.ua>.

© С. С. Рижков

Надійшла до редколегії 17.09.2014

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. *А. П. Шевцов*