

http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140508
 УДК 620.9
 Р 93

**PROBLEMS OF PURIFICATION INTENSIFICATION OF POWER PLANTS
 IN MULTIPHASE DISPERSED MEDIA AND METHODS
 OF THEIR SOLUTION (Part 1)**

**ПРОБЛЕМИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ОЧИСТКИ В БАГАТОФАЗНИХ
 ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК
 І СПОСОБИ ЇХ ВИРІШЕННЯ (частина 1)**

Sergiy S. Ryzhkov
sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0002-2201-6172

С. С. РИЖКОВ,
 канд. техн. наук

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The scientific and technical problems of the power plants improvement have been systematized. The urgency of the problem of the power plants purification in the multiphase dispersed media is proved. The main purification methods are analyzed, and previously unstudied pieces of problem of these processes intensification are identified. The task for the calculations of the scheme of complex intensification of the ultraturbophoretic transferal within the combined (internal and external) problem is set. The unstructured grid technology for the theoretical calculations of the pulsation ultrasonic particles deposition in the multipurpose grid coagulator is suggested and implemented. The aim of work is to develop the directions of the purification intensification of the dispersed multiphase flows on the basis of the study results analysis. These directions are to be developed to design the technical equipment which ensures the intensification of energy conservation and environmental cleanliness of the power plants. The processes of the transferal of the finely-dispersed phase by means of the ultrasonic and turbophoretic powers in the two-phase gas media of the power plants are the subject of the study. The scheme of complex intensification of the ultraturbophoretic transferal of the microparticles of particles is developed within the «the initial flow section – ultraturbophoretic grid coagulator» purification system on the basis of the performed analysis of physical and mathematical model of the process. The principles of intensification of the ultraturbophoretic transferal and finely-dispersed particles deposition are developed. These principles are reduced to the usage of the energy potential of the dispersed two-phase media to depose the particles; to the creation of the acoustic vibrations gradients in the wall-adjacent areas at the surface of the channels and in the flow volume; to the generation of turbulent pulsations by the bodies of deposition of the multi-functional purpose.

Keywords: analysis; intensification; purification; medium; dispersability; power generation; plant.

Анотація. Систематизовано науково-технічні проблеми вдосконалення енергетичних установок. Обґрунтовано актуальність проблеми очистки в багатофазних дисперсних середовищах для енергетичних установок. Виконано аналіз головних способів очистки та визначено недосліджені раніше частини проблеми інтенсифікації цих процесів.

Ключові слова: аналіз; інтенсифікація; очистка; середовище; дисперсність; енергетика; установка.

Аннотация. Систематизированы научно-технические проблемы совершенствования энергетических установок. Обоснована актуальность проблемы очистки в многофазных дисперсных средах для энергетических установок. Выполнен анализ основных способов очистки и определены неисследованные ранее части проблемы интенсификации этих процессов.

Ключевые слова: анализ; интенсификация; очистка; среда; дисперсность; энергетика; установка.

REFERENCES

- [1] Belousov V.V. *Teoreticheskie osnovy protsessov gazoочistki* [Theoretical fundamentals of gas cleaning processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 256 p.
- [2] Grin. X., Leyn V. *Aerozoli – pyli, dymy i tumany* [Aerosols – Dust, Smoke and Fog]. Leningrad, Khimiya Publ., 1969. 427 p.

- [3] *Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy: Spravochnik. V 2 ch.* [Atmosphere protection from industrial pollution: Reference book. Part 1, 2]. Pod red. S. Kalverta i G. Inglunda. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988.
- [4] Mednikov Ye.P. Turbulentnaya migratsiya chastits i osedanie aerorozolei [Turbulent particle migration and aerosol deposition]. *Kolloidnyy zhurnal – Colloid Journal*, 1980, vol. 42, no. 6, pp. 700–705.
- [5] Mednikov Ye.P. *Turbulentnyy perenos i osazhdenie aerorozolei* [Turbulent transfer and aerosol deposition]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.
- [6] Ofitsiyniy sait kompanii Ansys (Ansys Official Web-site). Available at: www.ansys.com.
- [7] Pirumov A.I. *Obespylivanie vozdukha* [Air Dust Removal]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 296 p.
- [8] Ryzhkov S.S., Bilyk B.I. Intensifikatsiya inertsiionno-turboforeticheskogo ulavlivaniya vysokodispersnykh aerorozolei v koagulyatorakh gazoochistnykh ustroystv [Intensification of inertial turbophoretic entrapment of finely-dispersed aerosols in coagulators of gas cleaning devices], *Zb. nauk. prats UDMTU – USMTU collection of scientific works*, 2002, no. 8, issue 386, pp. 66–76.
- [9] Ryzhkov S.V., Khmara O.M. Povyshenie effektivnosti separiruyushchego ustroystva s pomoshchyu sotovogo koagulyatora [Improvement of separation device efficiency by means of grid coagulator]. *Voprosy sudostroeniya – Shipbuilding Issues*, 1979, no. 16.
- [10] Ryzhkov S.S. Uzahalnena matematychna model vyznachennia intensyvnosti protsesu ochystky dyspersnykh bahatofaznykh potokiv u systemakh enerhetychnykh ustanovok [Generalized mathematical model of determination of intensity process of dispersed multiphase flows purification in power plants systems]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications NUS], 2014, no. 3, issue 453, pp. 69–76.
- [11] Ryzhkov S.S., Pastukhov S.Yu. Chislennoe modelirovanie osazhdeniya vysokodispersnykh chastits v protochnoy chasti separatsionnogo oborudovaniya [Numerical modeling of finely-dispersed particles deposition in flow part of separation equipment]. *Vestnik NUK* [NUS Journal. Electronic Edition], 2010, no. 3.
- [12] Bradbury L. The Structure of a Self-Preserving Turbulent Plane Jet. *J. Fluid Mech.*, 1965, no. 23, p. 1. 64.
- [13] Brock J.R.L. On the Theory of Thermal forces acting on Aerosol Particles. *J. Colloid Sci.*, 1962, no. 17, pp. 768–780.
- [14] Ryzhkov S.S., Basok B.I. Ekologicheskie resursosberegayushchie tekhnologii dlya promyshlennoy teplotekhniki na osnove dispersnykh dvukhfaznykh sred [Environmental resource-saving technologies for heat-process engineering on the basis of dispersed two-phase media]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Heat-process Engineering*, 2001, vol. 23 (4–5), pp. 141–145.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

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

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 характеризується розмірами фракцій від одиниці до декількох 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 та твердому станах.

Природний газ є полідисперсним середовищем і використовується як паливо в сучасних енергетичних установках. Наявність деяких рідких і твердих частинок у його складі значно знижує економічність, строк використання, а також експлуатаційні властивості установок. Вміст рідкої фази у природному газі паливних систем газотурбінних установок характеризується малими розмірами крапель – до 10 мкм.

Сьогодні мають місце 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 і потребує розробки газоочисного устаткування, здатного уловлювати частинки таких розмірів і використовувати ресурсозберігаючі можливості самих установок за рахунок використання енергії робочого тіла [13].

Аналогічні проблеми по розподілу газорідних середовищ мають місце в хімічній, харчовій, нафтогазовій промисловостях, що до призводить до погіршення навколишнього середовища.

**АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ
І ПУБЛІКАЦІЙ**

Сьогодні є багато літератури, яка присвячена вирішенню задач розподілу фаз у багатофазних потоках [2–7]. У цих роботах досить прискіпливо досліджено такі способи сепарації, як інерційний, турбо-, дифузіо- та термофоретичний.

Проте недостатньо приділено уваги процесам переносу високодисперсної фази за рахунок ультразвукових і турбофоретичних сил в багатофазних газових середовищах енергетичних установок, впливу на процеси очистки зміни розмірів частинок у процесі руху, а також умовам синтезу окремих способів на інтегральну інтенсивність очистки. В багатьох роботах відсутнє обґрунтування наукових положень інтенсифікації очистки дисперсних багатофазних потоків для розробки технічного устаткування.

МЕТА СТАТТІ – на підставі аналізу попередніх досліджень запропонувати напрямки інтенсифікації очистки дисперсних багатофазних потоків для створення технічного устаткування, яке забезпечуватиме підвищення рівня енергозбереження та екологічної чистоти енергетичних установок.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На основі аналізу фізичної та математичної моделі процесу розроблено схему комплексної ін-

тенсифікації ультратурбофоретичного переносу мікрочастинок у системі очищення: «початкова ділянка струменя – ультратурбофоретичний сітковий коагулятор», яку наведено на рис. 1. На ньому позначено: 1 – сопло; 2 – потік двофазного дисперсного середовища; 3 і 4 – нижня і верхня стінки каналу; 5 – багатофункціональний сітковий гофрований коагулятор; 6 – ультразвуковий пульсаційний вплив; U_i – інерційне осадження грубодисперсних частинок у зоні удару і розвороту; U_T – ультразвукове осадження високодисперсних частинок; U_{df} – дифузіофоретичне осадження високодисперсних частинок; U_t – турбофоретичне осадження високодисперсних частинок; U_{td} – осадження під дією турбулентної дифузії високодисперсних частинок.

При реалізації розробленої схеми в рамках зовнішньої та внутрішньої задач у системі проходять наступні процеси очищення. В області удару і розвороту струменя відбувається інерційне уловлювання грубодисперсних частинок. Для його інтенсифікації пропонується збільшувати швидкість витікання струменя з сопла до 25 м/с. Неосаджені частинки діаметром менше 3 мкм направляються на ультратурбофоретичні поверхні – багатофункціональний сітковий коагулятор та стінки каналу [8, 9]. Багатофункціональність виражається в здатності сітчастих гофрованих тіл генерувати мікровихри і здійснювати коагуляцію дрібних крапель у великі об'єми рідини за рахунок ефектів ультразвуку, турбофорезу, стікання під дією сил тяжіння і за рахунок капілярних сил [10–12].

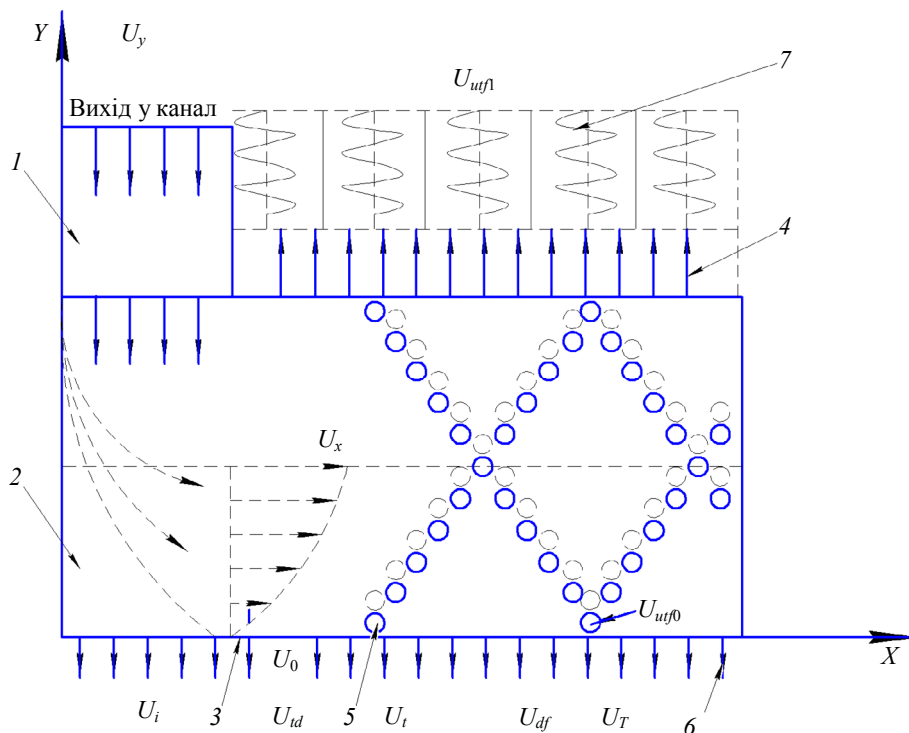


Рис. 1. Схема комплексної інтенсифікації переносу високодисперсних частинок у системі очищення «початкова ділянка струменя – ультратурбофоретичний сітковий коагулятор»

Для остаточного очищення від мікрокрапель до необхідних норм застосовуються багатосекційні неізотермічні сіткові коагулятори, що дозволяє збільшувати поверхні осадження, використовувати градієнтні поля акустичних коливань і пульсацій, які інтенсифікують осадження частинок.

У схемі реалізовані традиційні і нові методи інтенсифікації осадження як грубодисперсних, так і високодисперсних частинок у рамках внутрішньої та зовнішньої задач за рахунок сил інерції, ультраакустичних (пульсаційних) коливань, дифузіїфорезу, сил турбулентної дифузії, турбофорезу і коагуляції частинок.

Нові принципи інтенсифікації ультратурбофоретичного переносу та осадження високодисперсних частинок зводяться до використання енергетичного потенціалу дисперсних двофазних середовищ для осадження частинок; до створення градієнтів акустичних коливань в пристінних областях на поверхні каналів і в об'ємі потоку; генерації турбулентних пульсацій тілами осадження багатофункціонального призначення.

Для дослідження ефективності уловлення дисперсного двофазного середовища в елементі сепараційного обладнання виконано математичне моделювання процесів осадження дисперсних частинок з використанням моделі [14]. При виконанні розрахунків використовувався сучасний, універсальний програмний комплекс, призначений для розв'язання задач механіки рідин і газів [10, 11].

Вхідна концентрація дисперсної фази (аерозольних частинок) становила 100 мг/м^3 , розрахунковий мінімальний діаметр частинок $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, а максимальний – $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Вивчався діапазон початкових швидкостей від 0,5 до 20 м/с.

Дослідження робочого каналу сепараційного обладнання виконано з пульсаційним коагулятором з 5, 10, 20 і 30 рядами сітки діаметром 0,5 і 0,25 мм. На рис. 2 і 3 зображені графіки залежності сумарного коефіцієнта уловлення та газодинамічного опору від швидкості в каналі з різною кількістю рядів коагуляційної сітки діаметром 0,5 мм (а – 5, б – 10, в – 20 і г – 30 рядів).

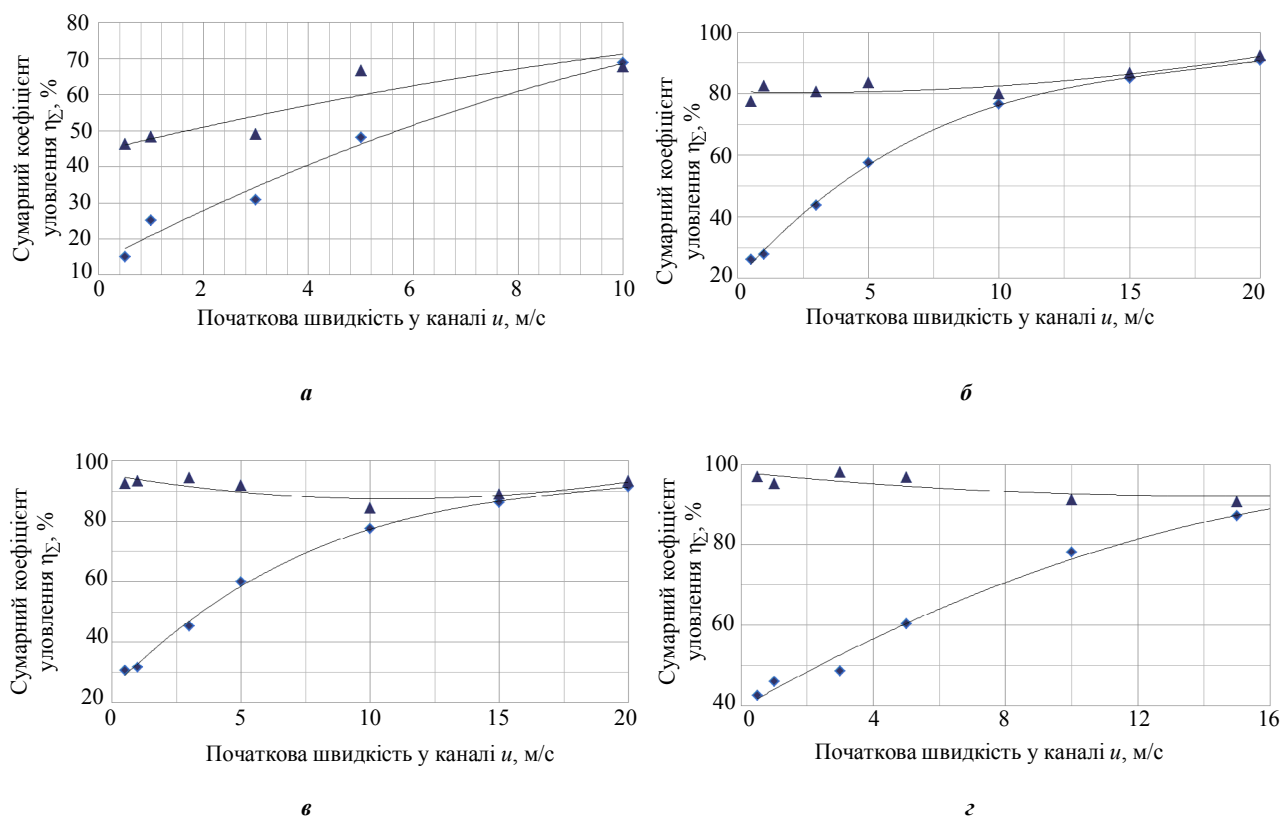


Рис. 2. Залежності сумарного коефіцієнта уловлення від швидкості в каналі з різною кількістю рядів коагуляційної сітки діаметром 0,5 мм: ◆ – без пульсацій; ▲ – з пульсаціями

Розрахунки показують, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору (приріст газодинамічного опору в інтервалі початкової швидкості потоку 0,5...20 м/с становить: 0,04...35 Па при 5 рядах; 5,6...711,2 Па при 10 рядах; 0,23...531,8 Па при 20 рядах; 0,23...531,8 Па при 30 рядах).

У той же час поперечні пульсації значно збільшують значення сумарного коефіцієнта уловлення при 5 рядах у діапазоні швидкостей від 0,5 до 5 м/с: з 15 до 46,31 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с і з 48,07 до 66,69 % при початковій швидкості потоку 5 м/с; при 10 рядах від 0,5 до 7 м/с: з 26,13 до 77,42 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с і з 68,23 до 81,05 % при початковій швидкості потоку 7 м/с; при 20 рядах у діапазоні швидкостей від 0,5 до 10 м/с: з 30,63 до 92,47 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с і з 77,71 до 84,41 % при початковій швидкості потоку 10 м/с; при 30 рядах у діапазоні швидкостей від 0,5 до 10 м/с: з 42,5 до 96,94 % при початковій

швидкості потоку 0,5 м/с і з 78,25 до 91,25 % при початковій швидкості потоку 10 м/с.

Аналогічні результати для сітки діаметром 0,25 мм наведені на рис. 4 і 5 (а – 5, б – 10, в – 20 і г – 30 рядів). У каналі з 5 рядами коагуляційної сітки приріст газодинамічного опору становить 0,4...11,8 Па в інтервалі початкової швидкості потоку 0,5...15 м/с. У той же час поперечні пульсації збільшують значення сумарного коефіцієнта вловлення в діапазоні швидкостей в каналі з 5 рядами від 0,5 до 5 м/с: з 42,9 до 56,6 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с і з 83,9 до 84,3 % при початковій швидкості потоку 5 м/с; у каналі з 10 рядами – від 0,5 до 10 м/с: з 64,9 до 72,8 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с і з 93,6 до 94,3 % при початковій швидкості потоку 7 м/с; у каналі з 20 рядами – від 0,5 до 5 м/с: з 66,8 до 92,6 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с і з 88,1 до 91,8 % при початковій швидкості потоку 5 м/с; у каналі з 30 рядами – від 0,5 до 10 м/с: з 70,3 до 95,2 % при початковій швидкості потоку 0,5 м/с і з 96,9 до 97,7 % при початковій швидкості потоку 10 м/с.

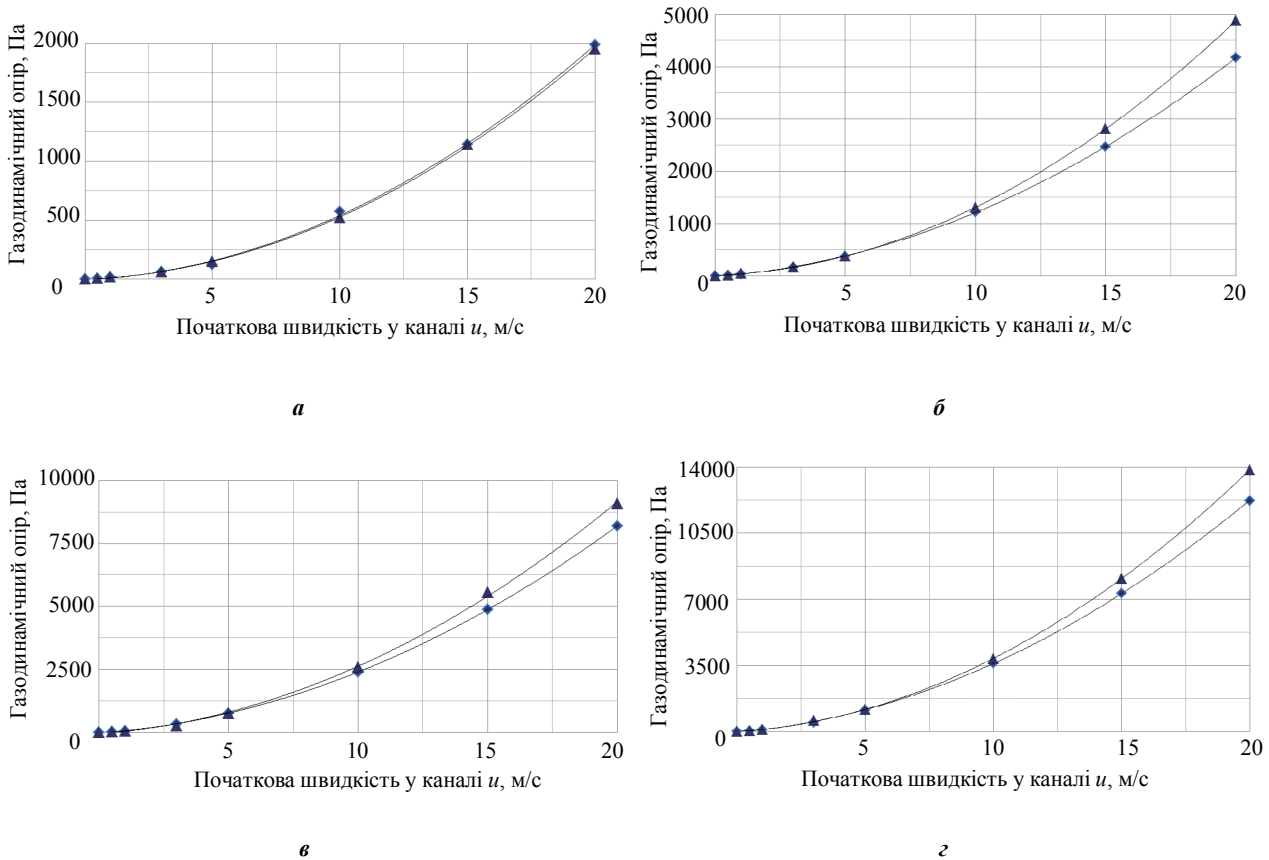


Рис. 3. Залежності газодинамічного опору від швидкості в каналі з різною кількістю рядів коагуляційної сітки діаметром 0,5 мм: ◆ – без пульсацій; ▲ – з пульсаціями

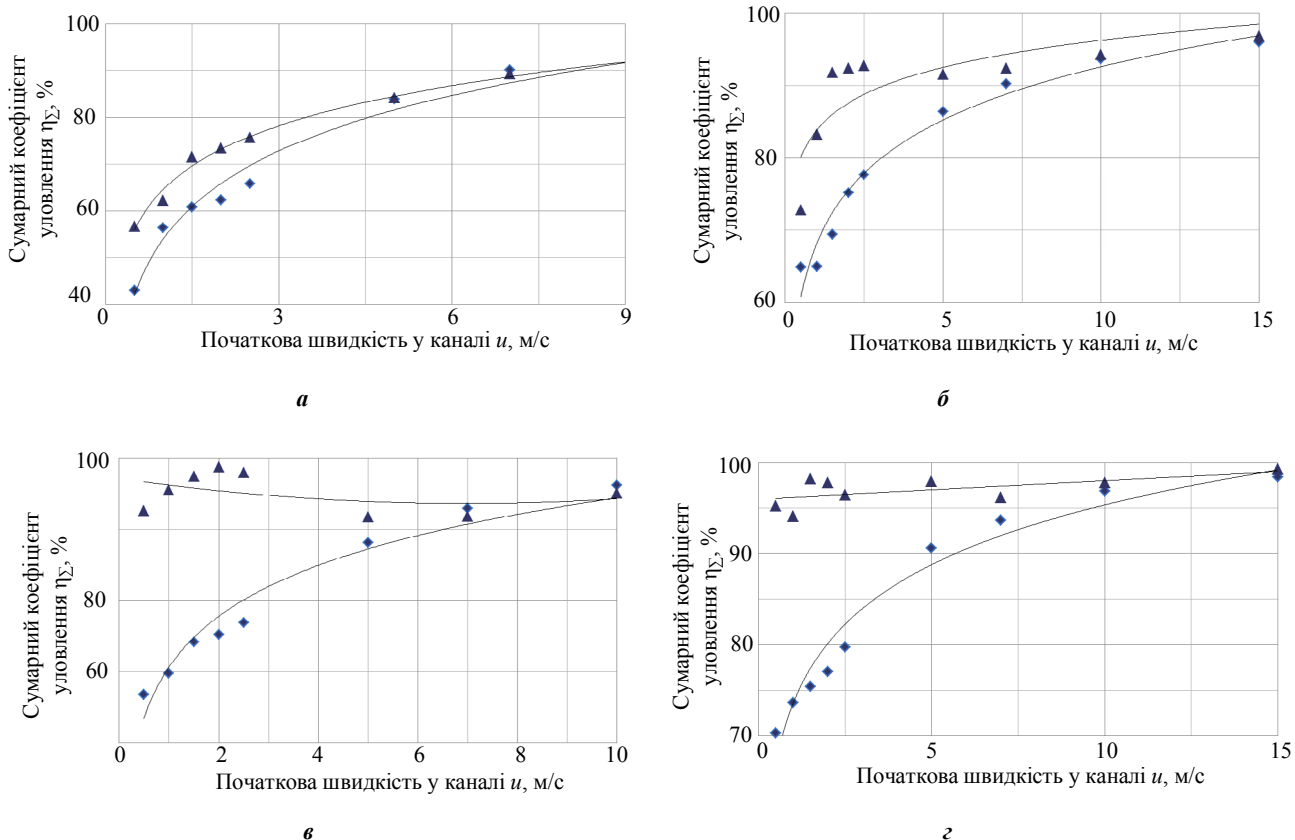


Рис. 4. Залежності сумарного коефіцієнта уловлення від швидкості в каналі з різною кількістю рядів коагуляційної сітки діаметром 0,25 мм: \blacklozenge – без пульсацій; \blacktriangle – з пульсаціями

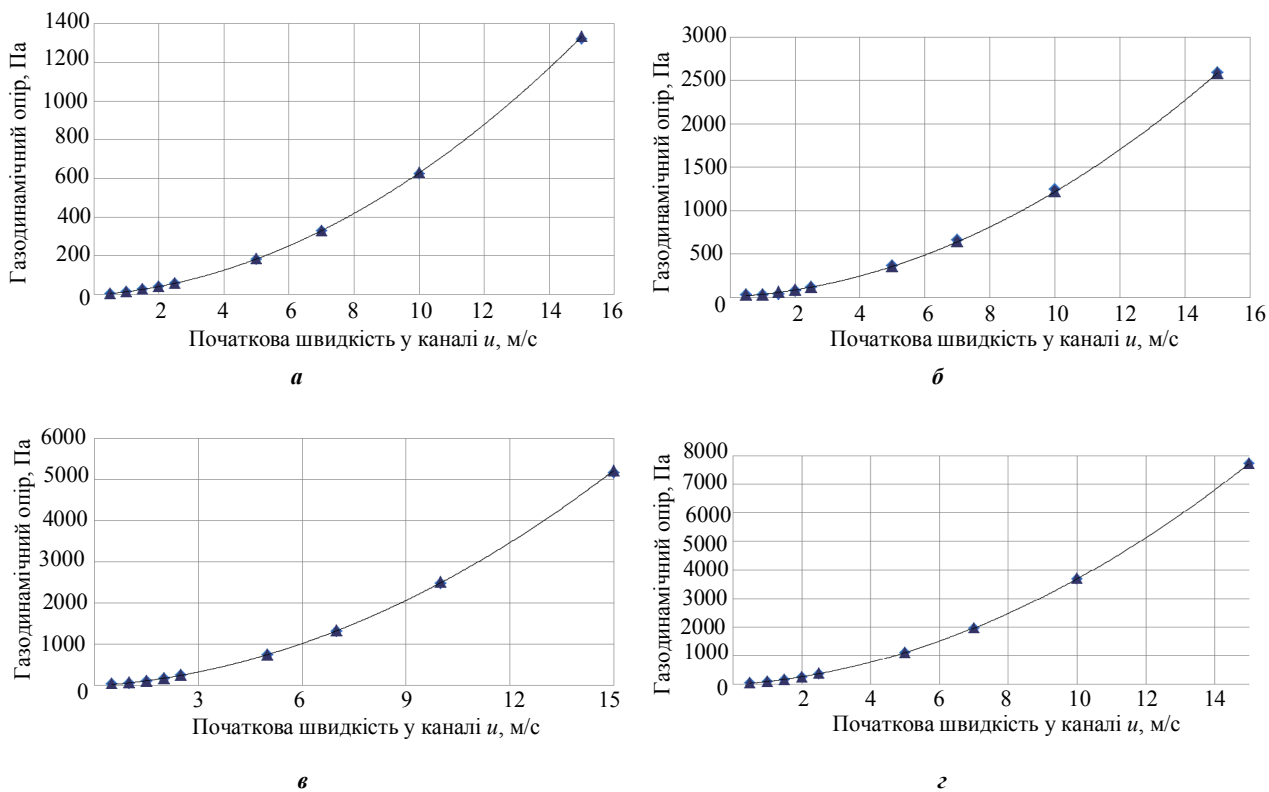


Рис. 5. Залежності газодинамічного опору від швидкості в каналі з різною кількістю рядів коагуляційної сітки діаметром 0,25 мм: \blacklozenge – без пульсацій; \blacktriangle – з пульсаціями

ВИСНОВКИ

1. Виконано теоретичні дослідження ультратурбофоретичного переносу в рамках комплексної задачі з пульсаційними коагуляторними сітками з числом рядів від 5 до 30 з діаметрами сітки від 0,1 до 0,5 мм у діапазоні частоти коливань від 100 до 10000 Гц та швидкостях потоку від 0,5 до 20 м/с. Установлено, що наявність поперечних пульсацій майже не впливає на збільшення значення газодинамічного опору (приріст газодинамічного опору становить від 0,5 до 5 % при швидкостях 0,5...20 м/с).

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

3. Визначено вплив діаметра сітки коагулятора на пульсаційне осадження частинок – чим менший

діаметр проволочки, тим ефективніше осадження: зменшення діаметра проволочки з 0,5 до 0,1 підвищило ефективність осадження з 20 до 60 % при швидкостях 0,5 м/с та 30 рядах, що обумовлено критичними числами Стокса для осадження мікрочастинок – чим менший розмір (діаметр) проволочки, тим більша ефективність осадження.

4. Розроблено схему комплексної інтенсифікації ультратурбофоретичного переносу частинок в рамках зовнішньої та внутрішньої задач. У ній реалізовані традиційні і нові методи інтенсифікації осадження як грубодисперсних, так і високодисперсних частинок у рамках внутрішньої та зовнішньої задач за рахунок сил інерції, ультраакустичних (пульсаційних) коливань, дифузіїфорезу, сил турбулентної дифузії, турбофорезу і коагуляції частинок. Розроблено 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Белоусов, В. В. Теоретические основы процессов газоочистки [Текст] / В. В. Белоусов. – М. : Metallurgiya, 1988. – 256 с.
- [2] Грин, Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы [Текст] / Х. Грин, В. Лейн. – Л. : Химия, 1969. – 427 с.
- [3] Защита атмосферы от промышленных загрязнений [Текст] : справочник : в 2 ч. / под ред. С. Калверта и Г. Инглунда. – М. : Metallurgiya, 1988. – 760 с.
- [4] Медников, Е. П. Турбулентная миграция частиц и оседание аэрозолей [Текст] / Е. П. Медников // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, № 6. – С. 700–705.
- [5] Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е. П. Медников. – М. : Наука, 1981. – 176 с.
- [6] Офіційний сайт компанії Ansys [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.ansys.com.
- [7] Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов. – М. : Стройиздат, 1981. – 296 с.
- [8] Рыжков, С. В. Повышение эффективности сепарирующего устройства с помощью сотового коагулятора [Текст] / С. В. Рыжков, О. М. Хмара. – Л. : Вопросы судостроения. – 1979. – № 16.
- [9] Рыжков, С. С.(ст.) Интенсификация инерционно-турбофоретического улавливания высокодисперсных аэрозолей в коагуляторах газоочистных устройств [Текст] / С. С. Рыжков(ст.), Б. И. Билык // 3б. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ. – 2002. – № 8 (386). – С. 66–76.
- [10] Рыжков, С. С. Узагальнена математична модель визначення інтенсивності процесу очистки дисперсних багатофазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / С. С. Рыжков // 3б. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2014. – № 3 (453). – С. 69–76.
- [11] 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 доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [12] 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.

- [13] **Brock, J. R. L.** On the Theory of Thermal forces acting on Aerosol Particles [Текст] / J. R. L. Brock // J. Colloid Sci., 1962, 17. – P. 768–780.
- [14] **Bradbury, L.** The Structure of a Self-Preserving Turbulent Plane Jet. [Текст] / L. Bradbury // J. Fluid Mech., 1965, 23. – P. 1–64.

© С. С. Рижков

Надійшла до редколегії 08.07.2014

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