

DOI 10.15589/jnn20160306  
УДК 629.12.03  
Р93

**PROBABLE ESTIMATION  
OF FRACTIONAL EFFICIENCY OF AEROSOLS COLLECTION  
IN THE BOUNDARY LAYERS OF MULTIPURPOSE SURFACES  
IN POWER PLANTS**

**ЙМОВІРНІСТНА ОЦІНКА  
ФРАКЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЛОВЛЮВАННЯ АЕРОЗОЛІВ  
В ПРИКОРДОННИХ ШАРАХ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ  
ПОВЕРХОНЬ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ**

**Sergiy S. 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.** The probabilistic assessment of fractional collection efficiency of aerosol in the boundary layers of the multi-functional mesh surfaces is proposed.

**Keywords:** aerosol; grid; surface; gradient; pressure; temperature; concentration; efficiency.

**Анотація.** Пропонується ймовірнісна оцінка фракційної ефективності вловлювання аерозолів в прикордонних шарах багатофункціональних сітчастих поверхонь.

**Ключові слова:** аерозоль; сітка; поверхня; градієнт; тиск; температура; концентрація; ефективність.

**Аннотация.** Предлагается вероятностная оценка фракционной эффективности улавливания аэрозолей в пограничных слоях многофункциональных сетчатых поверхностей.

**Ключевые слова:** аэрозоль; сетка; поверхность; градиент; давление; температура; концентрация; эффективность.

## REFERENCES

- [1] Ryzhkov S. S. *Issledovaniya gazodinamiki i teploperenosa turbulentnykh gazovykh sred s pomoshchyu golograficheskoy interferometrii* [Research of gas dynamics and heat transfer of turbulent gas media using holographic interferometry] *Elektronnyi visnyk NUK — Bulletin of NUS*, 2010, no. 4.
- [2] Ryzhkov S. S. *Problemy intensyfikatsii ochystky v bahatofaznykh dyspersnykh seredovyshchakh enerhetychnykh ustanovok i sposoby yikh vyrishennia (chastyna 1)* [Problems of intensification of treatment in multiphase dispersed media power systems and solutions (part 1)] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2014, no. 5, pp. 51–58.
- [3] Ryzhkov S. S. *Problemy intensyfikatsii ochystky v bahatofaznykh dyspersnykh seredovyshchakh enerhetychnykh ustanovok i sposoby yikh vyrishennia (chastyna 2)* [Problems of intensification of treatment in multiphase dispersed media power systems and solutions (part 2)] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2014, no. 6, pp. 51–57.
- [4] Ryzhkov S. S. *Uzahalnena matematychna model vyznachennia intensyvnosti protsesu ochystky dyspersnykh bahatofaznykh potokivu systemakh enerhetychnykh ustanovok* [A generalized mathematical model for determining the intensity of the treatment of disperse multiphase systems potokivu power plants] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2014, no. 3, pp. 69–76.
- [5] Shevtsov A. P., Vasilev A. G., Kafka Ye. A. *Metodika veroyatnostnoy otsenki effektivnosti voloknistykh filtrov* [Methods of probabilistic assessment of the effectiveness of fibrous filters] *Teploenergetika i khladotekhnika: Sb.nauchn. tr.* [Thermal Engineering and cold technics: Collection of scientific publications]. Nikolaev, NKI Publ., 1985, pp. 58–63.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Детерміновані методи визначення фракційної ефективності при вловлюванні аерозолів в енергетичних установках базуються на рішенні систем рівнянь динаміки багатофазного потоку. Одночасно достовірність отриманих результатів пов'язана з коректним завданням умов однозначності. Оскільки початкові і граничні умови для моделювання багатофазних систем мають ймовірнісний характер, то результати, що отримані з допомогою детермінованих математичних моделей, мають додаткові похибки, що пов'язані з суб'єктивним визначенням крайових умов.

Альтернативним методом опису фізичних процесів в багатофазних потоках, є математичні моделі та крайові умови, що визначаються ймовірнісними характеристиками та використовують ймовірності 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 в прикордонних шарах багатофункціональних поверхонь енергетичних установок.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Значна кількість сучасних досліджень висадження дрібнодисперсної фази базується на аналізі руху частинок діаметром від 1 до 10 мкм при різних термогідродинамічних умовах на підгрунтях математичного та фізичного моделювання. Процеси термофоретичного ефекту і градієнти температур, тиску та концентрацій можливо використати для досягнення необхідної траєкторії руху частинок, що буде сприяти процесу осадження в досліджуваній зоні [1, 4].

Дослідження термогідродинамічних процесів з турбулізацією багатофазного потоку [2, 3, 5] обґрунтували ефективність використання пульсаційних складових швидкості та тиску на процеси осадження частинок на поверхнях.

Однак закономірності впливу форми та розташування багатофункціональних поверхонь на фракційну ефективність осадження аерозолів в прикордонних шарах очисного обладнання енергетичних установок в приведених дослідженнях відсутні.

Вплив форми і розмірів багатофункціональних сітчастих поверхонь на процеси осадження визначається розподілом температурних, концентраційних та швидкісних прикордонних шарів. Взаємна дія градієнтів різних фізичних показників визначають 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 і температури у по-

верхні. Визначення ймовірнісної оцінки фракційної ефективності вловлювання аерозолів в прикордонних шарах багатофункціональних сітчастих поверхонь та розшук закономірностей їх зміни уздовж цих поверхонь є недослідженою раніше частиною проблеми.

**МЕТОЮ СТАТТІ** є визначення фракційної ефективності вловлювання аерозолів в прикордонних шарах багатофункціональних поверхонь методом ймовірнісного оцінювання дотику частинок аерозолу з ділянкою їх поверхні. Поставлена мета досягається вирішенням наступних задач:

- обґрунтувати основні теоретичні положення оцінювання ймовірності дотику частинок аерозолу з ділянкою поверхні;

- визначити на основі теоретичних положень оцінювання ймовірності дотику частинок аерозолу з ділянкою поверхні залежності для математичного моделювання фракційної ефективності при вловлюванні аерозолів багатофункціональними сітчастими поверхнями;

- виконати чисельний експеримент градієнтних технологій очистки багатофазних потоків в прикордонних шарах багатофункціональних поверхонь;

- обґрунтувати достовірність отриманих результатів запропонованого способу, що визначаються ймовірнісними характеристиками та використовують ймовірності підходи до досліджень.

## ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При оцінці ймовірнісної фракційної ефективності в прикордонних шарах багатофункціональних поверхонь припускається, що в енергетичних установках осадження часток всіх розмірів відбувається в тому разі, коли на віддалені від ділянки поверхні початкові координати частинок знаходяться на лінії руху, що розташовуються над ділянкою поверхні на відстані меншому або рівному її еквівалентному радіусу.

Багатофункціональні поверхні пристроїв очистки аерозолів в енергетичних установках можливо представити в вигляді системи суцільних або не суцільних елементів різної форми. Суцільні поверхні складають прямолінійні та криволінійні канали з гладкою або шорсткою поверхнями, а не суцільні поверхні складаються з волокон матеріалів малої щільності, які можливо представити в вигляді системи слоїв з рівномірним розташуванням волокон, які регулярно орієнтовані в просторі та розташовані один від одного на відстані більше ніж діаметр волокна в 2–3 рази (рис. 1).

Така класифікація багатофункціональних поверхонь дозволяє використати наступні припущення:

- при русі часток аерозолу в прикордонних шарах багатофункціональних поверхонь граничні умови відновлюються перед кожною черговою ділянкою;

- проходження аерозольної частинки через сітчастий матеріал рівнозначно проведенню серії послідов-

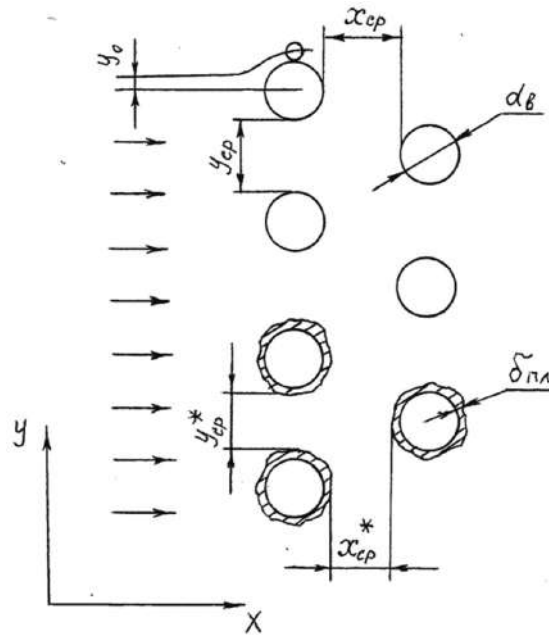


Рис. 1. Схема волокнистого матеріала

них незалежних випробувань (проходження частинки через окремий шар), в результаті кожного з яких можливе з декою ймовірністю настання очікуваної події — осадження частинки, при чому ймовірність осадження на кожному такому шарі постійна та може бути визначена заздалегідь;

– осадження різних частинок відбувається незалежно одна від одної;

– розглядається поперечний перетин шару сітчастого матеріалу, на одиниці площі якого в середньому знаходиться  $n$  волокон;

– розташування волокон розглядається як двовимірне.

Для одновимірної функції щільності ймовірності має вираз [5]:

$$f(x) = n_x \exp(-n_x x)$$

де  $n_x$  — середня кількість волокон, яка розміщена на одиницю довжини вздовж осі  $X$ .

Одновимірна функція щільності ймовірності для осі  $Y$ :

$$f(y) = n_y \exp(-n_y y).$$

А ймовірність того, що найближче до даного волокно знаходиться в області від  $X$  до  $X + dX$  та від  $Y$  до  $Y + dY$  дорівнює:

$$dP = dP_x dP_y = n_x n_y \exp(-n_x x - n_y y) dx dy.$$

Аерозольна частинка осаджується на волокні в тому випадку, якщо на віддаленні від волокна (де потік не спотворено) початкова ордината частин-

ки  $y_0$  знаходиться на лінії току, яка проходить над волокном на відстані меншій або, яка дорівнює радіусу частинки.

Ймовірність осадження частинки на волокні при її початковій ординаті  $y \leq y_0$ :

$$P_y = \int_0^{y_0} n_y \exp(-n_y y) dy = 1 - e^{-n_y y_0}.$$

Значення  $P_y$  виражає ймовірність того, що при деякому значенні  $X$  центр волокна має ординату  $0 \leq y \leq y_0$ , яку відраховують від деякої довільної, але фіксованої точки  $y = 0$ .

Якщо щільність волокнистого матеріалу невелика, то середня відстань між волокнами (без урахування діаметра волокон) на підставі виразу (3) визначається наступним чином:

$$x_{cp} = \int_0^{\infty} x f(x) dx = \frac{1}{n_x}. \tag{8}$$

Якщо врахувати діаметр сухих волокон, то середня відстань між шарами (рис. 1) визначається виразом:

$$x_{cp} = \frac{1}{n_x} - d_b. \tag{9}$$

Для змочуваних фільтрів з урахуванням товщини рідкої плівки на волокні:

$$x_{cp}^* = \frac{1}{n_x} - d_b - 2\delta_{пл}. \tag{10}$$

Імовірність осадження частинки на шарі дорівнює добутку:

$$P_{\text{сл}} = P_x P_y.$$

і з урахуванням виразів (9, 10) імовірність того, що на проміжку  $\Delta x = x_{\text{ср}}$  немає інших волокон

$$P_x = 1 - \int_0^{x_{\text{ср}}} n_x \exp(-n_x x) dx = e^{-n_x x_{\text{ср}}}.$$

Тоді для сухого матеріалу фільтра:

$$P_x = e^{n_x d_n^{-1}}, \quad (11)$$

а для змочуваного:

$$P_x^* = e^{n_x d_n + n_x 2\delta_{\text{м}}^{-1}}. \quad (12)$$

При товщині фільтра  $\delta_{\text{сл}}$  число слоїв в ньому дорівнює:

$$m = \delta_{\text{сл}} n_x.$$

А фракційна ефективність фільтра (імовірність осадження):

$$P_i = 1 - (1 - P_{\text{сл}})^m. \quad (13)$$

З урахуванням виразів (4, 11, 12) ефективність сухого фільтра:

$$P_i = 1 - \left[ 1 - e^{n_x d_n^{-1}} (1 - e^{-n_y y_0}) \right]^{\delta_{\text{сл}} n_x}, \quad (14)$$

а змочуваного фільтра:

$$P_i^* = 1 - \left[ 1 - e^{n_x d_n + n_x 2\delta_{\text{м}}^{-1}} (1 - e^{-n_y y_0}) \right]^{\delta_{\text{сл}} n_x}. \quad (15)$$

При градієнтному впливі, траєкторії руху частинок змінюються як показано на рис. 2. В результаті цього значення величини  $y_0$  збільшується до значення  $y_{0r}$  і для урахування градієнтного впливу в виразах (14, 15) замість  $y_0$  необхідно підставити значення  $y_{0r}$

$$P_i = 1 - \left[ 1 - e^{n_x d_n^{-1}} (1 - e^{-n_y y_{0r}}) \right]^{\delta_{\text{сл}} n_x};$$

$$P_i^* = 1 - \left[ 1 - e^{n_x d_n + n_x 2\delta_{\text{м}}^{-1}} (1 - e^{-n_y y_{0r}}) \right]^{\delta_{\text{сл}} n_x}.$$

На рис. 3 представлено результати розрахунку фракційної ефективності від товщини фільтруючого матеріалу та інтенсивності градієнтного впливу.

Ця залежність показує значне збільшення фракційної ефективності фільтрації матеріалу з ростом товщини фільтруючого шару та інтенсивності градієнтного впливу. Величина інтенсивності градієнтного впливу залежить від розміру частинок, що осаджується. При збільшенні діаметру частинок, градієнтного впливу на них зменшується.

Залежність фракційної ефективності від діаметра волокон, пористості та товщини рідкої плівки для сітчастих поверхонь представлені на рис. 4, 5, 6.

Як видно з цих залежностей, ефективність фільтрації частинок збільшується зі зменшенням діаметра волокон сітчастого матеріалу, зменшенням пористості матеріалу, та збільшенням товщини рідкої плівки.

В умовах енергетичних установок і технологічного обладнання дисперсність частинок, які повинні бути відфільтровані, складає від 0,1 до 50 мкм. Для таких умов за результатами проведених досліджень рекомендується наступне.

1. В сухих фільтрах, при швидкості газорідних потоків до 4,5 м/с використовувати сітчасті матеріали з діаметром волокон від 10 до 40 мкм і пористістю 0,95...0,99.

2. Змочені волокна фільтрувального матеріалу дозволяють з плівкою рідини до 35 мкм підвищують фракційну ефективність до 15% відносно сухих фільтрів.

3. Використання попереднього градієнтного ефекту підвищує фракційну ефективність фільтрації в залежності від розміру частинок і становить для еквівалентних діаметрів до 1 мкм на 16...27% відносних, до 5 мкм на 9% відносних, до 10 мкм на 6% відносних і вище 20 мкм до 3% відносних.

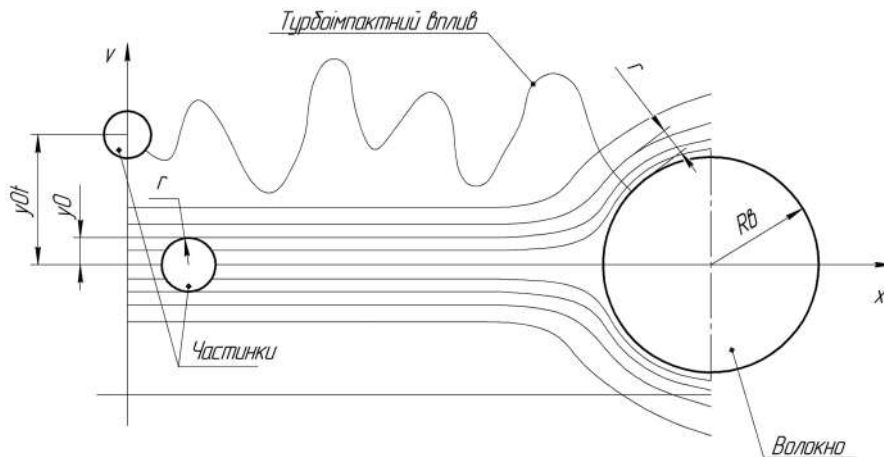
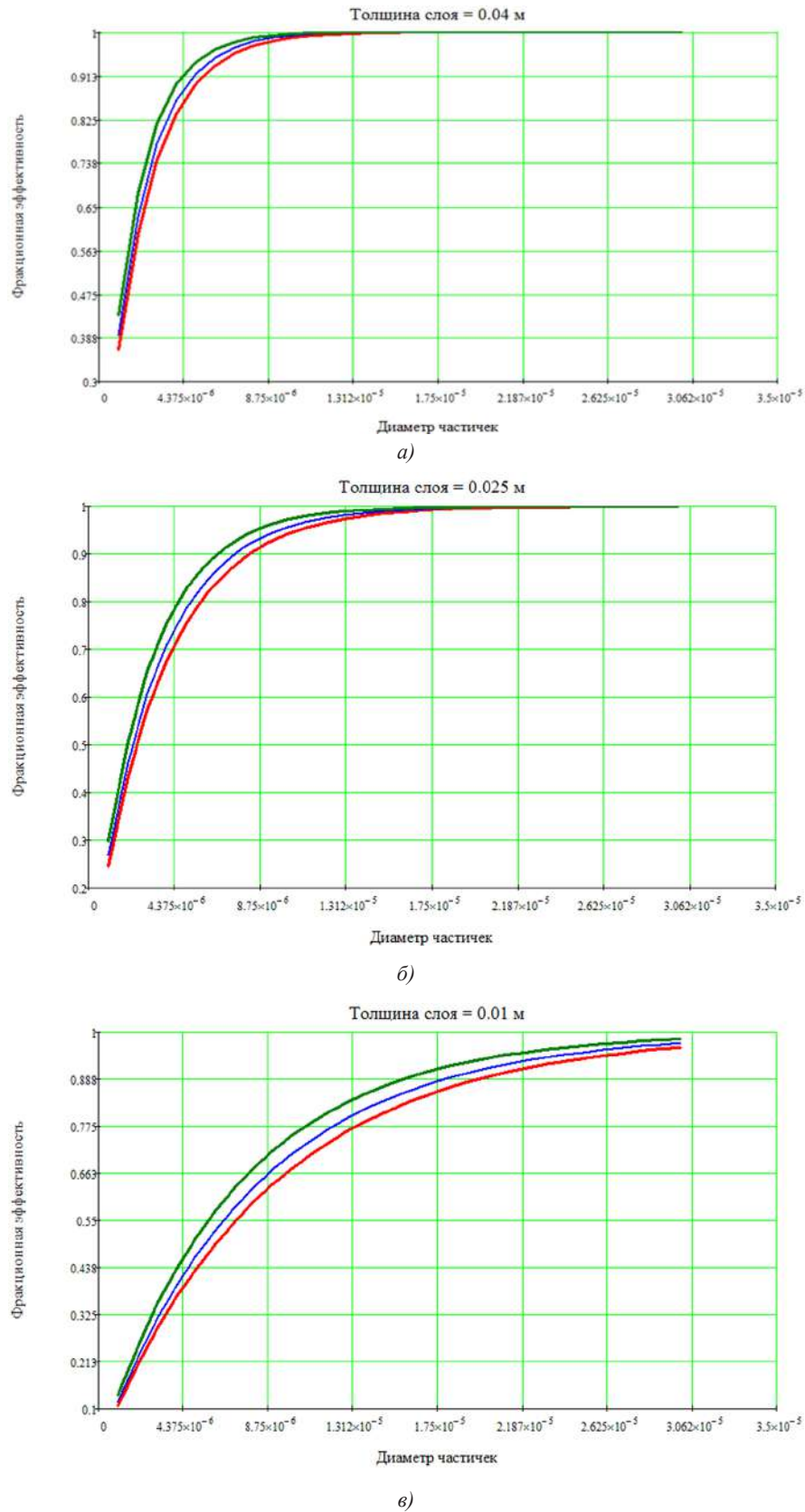


Рис. 2. Схема градієнтного впливу



**Рис. 3.** Залежність фракційної ефективності від товщини фільтруючого матеріалу  $\delta_{сл}$  з урахуванням градієнтного впливу  $n_x = n_y = \text{const}$ ,  $d_B = 25 \text{ мкм}$  :

■ — без градієнтного впливу; ■ — з градієнтним впливом  $y_{0r} = 1,25y_0$ ; — з градієнтним впливом  $y_{0r} = 1,10y_0$

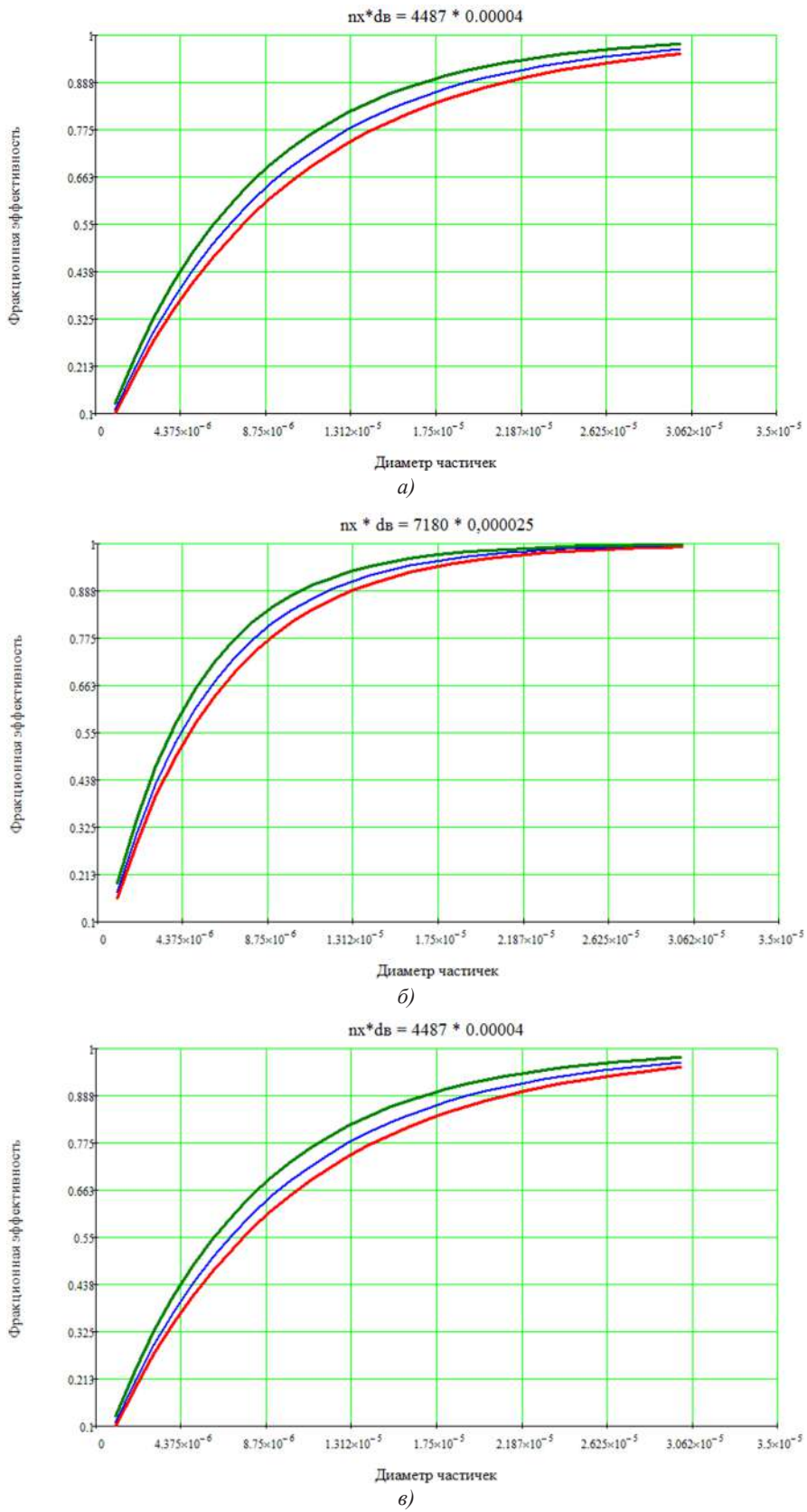


Рис. 4. Залежність фракційної ефективності від діаметра волокон при постійній товщині матеріалу  $\delta_{\text{ст}} = 0,015$  м та постійній пористості  $\text{P}_c = 0,975$

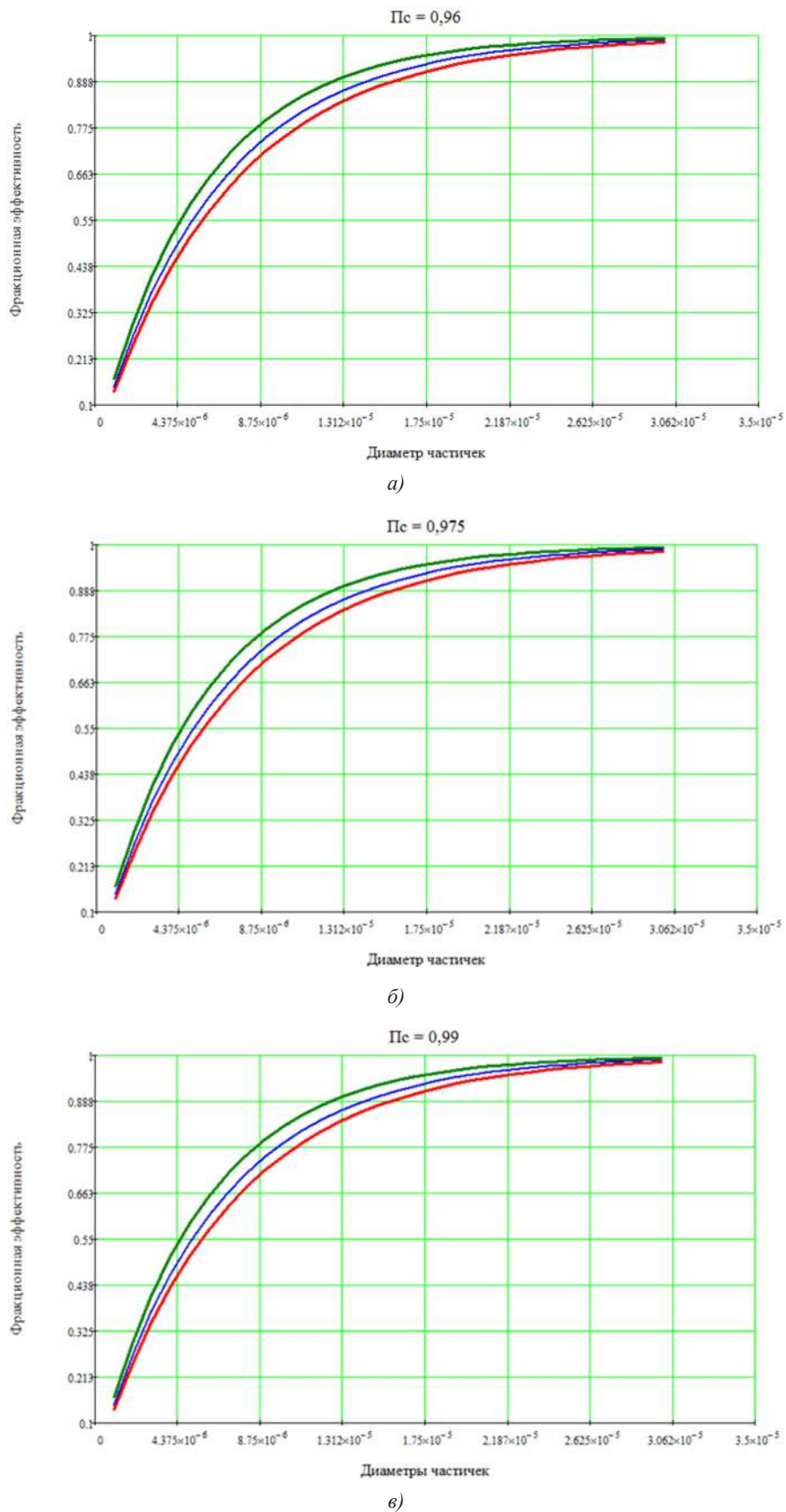


Рис. 5. Залежність фракційної ефективності від пористості матеріалу при постійній товщині матеріалу  $\delta_{cd} = 0,015$  м і структурі  $n_x = n_y = 7180$  1/м

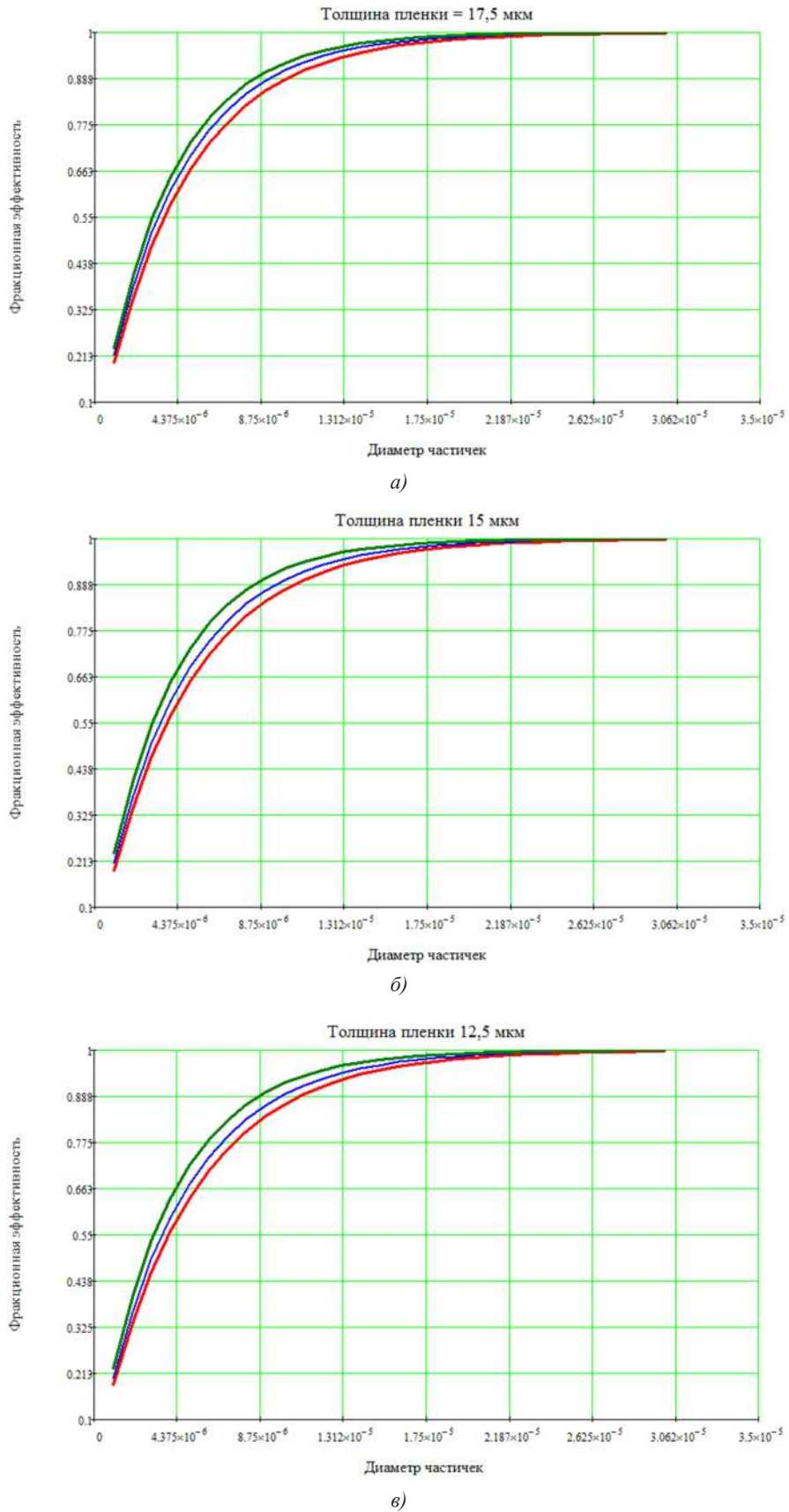


Рис. 6. Залежність фракційної ефективності від товщини рідкої півки  $\delta_{пл}$  при постійній товщині матеріалу  $\delta_{ст} = 0,015$  м та діаметрі волокон  $d_b = 25$  мкм



**ВИСНОВКИ.** 1. Обґрунтовано використання методу дослідження фракційної ефективності вловлювання аерозолів в прикордонних шарах багатофункціональних поверхонь методом ймовірностного оцінювання дотику частинок аерозолю з ділянкою їх поверхні для випадків сухих і зволжених волокнистих матеріалів при градієнтних початкових ефектах. 2. Використання попереднього градієнтного ефекту підвищує фракційну ефективність фільтрації частинок в залежності від їх еквівалентних діаметрів від 3% до 27% відносних. 3. Результати дослідження обґрунтовують рекомендації до застосування сітчастих матеріалів при фільтрації полідисперсних частинок у фільтрах енергетичних установок і технологічного обладнання. 4. Для більш детального визначення впливу градієнтних процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей та розробки на їх основі високоефективних інноваційних технологій для енергетичних установок і технологічного обладнання треба продовжити дослідження для отримання залежності градієнтної інтенсифікації від дії сил інерції, турбофорезу, дифузіофорезу, опору і Саффмана.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Рижков, С. С.** Исследования газодинамики и теплопереноса турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии [Текст] / С. С. Рижков // *Електронний вісник НУК* — 2010 — № 4.
- [2] **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*. — 2014. — Вип. 5. — С. 51–58.
- [3] **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. — Вип. 6. — С. 51–57.
- [4] **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*. — 2014. — Вип. 3. — С. 69–76.
- [5] **Шевцов, А. П.** Методика вероятностной оценки эффективности волокнистых фильтров [Текст] / А. П. Шевцов, А. Г. Васильев, Е. А. Кафка // *Теплоэнергетика и хладотехника* : Сб. научн. тр. — Николаев : НКИ, 1985. — С. 58–63.

---

© С. С. Рижков

Надійшла до редколегії 05.08.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. С. І. Сербін