

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЕЛЕМЕНТІ СЕПАРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

С. С. Рижков, канд. техн. наук;
Ю. Г. Золотий, старш. викл.;
Д. В. Довгань, наук. співроб.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розроблено робочий канал експериментальної установки для візуалізації полідисперсних течій у неізотермічних умовах для елементів сепараційного обладнання методом голографічної інтерферометрії. Отримано дані розподілу температурного поля газового потоку при температурі потоку $T_0 = 110$ °С, температурі стінки $T_c = 20$ °С і швидкостях потоку $u_0 = 0,3$ м/с у розрахунковому дослідному комплексі в каналі із чотирма рядами сітки.

Ключові слова: розшифровка голографічних інтерферограм, газодинаміка, теплоперенос, сепараційне обладнання.

Аннотация. Разработан рабочий канал экспериментальной установки для визуализации полидисперсных течений в неизоотермических условиях для элементов сепарационного оборудования методом голографической интерферометрии. Получены данные распределения температурного поля газового потока при температуре потока $T_0 = 110$ °С, температуре стенки $T_c = 20$ °С и скоростях потока $u_0 = 0,3$ м/с в расчетном исследовательском комплексе в канале с четырьмя рядами сетки.

Ключевые слова: расшифровка голографических интерферограмм, газодинамика, теплоперенос, сепарационное оборудование.

Abstract. A working channel of an experimental unit for visualization of polydisperse flows in non-isothermal conditions for the elements of separation equipment using holographic interferometry is developed. The data of temperature distribution of gas flow at $T_0 = 110$ °С and velocity $u_0 = 0,3$ m/s, wall temperature $T_c = 20$ °С in the channel with 4 rows of the grid is obtained.

Keywords: decoding holographic interferograms, gas dynamics, heat transfer, separation equipment.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

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

ним з методів підвищення ефективності відокремлення високодисперсних частинок є використання сіткових гофрованих коагуляторів, які досить детально вивчені в ізотермічних умовах. Створення неізотермічних умов протікання дисперсного двофазного середовища в сіткових

коагуляторах дозволяє інтенсифікувати осадження частинок за рахунок сил термофорезу, що виникають при існуванні температурного градієнта. Зокрема такі градієнти можуть виникати за рахунок охолодження поверхні осадження відносно вхідної температури потоку. Розрахунки показують, що при різниці температур $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ та низьких швидкостях потоку (менше 1 м/с) коефіцієнт уловлювання зростає на 12% у порівнянні з ізотермічними умовами. Але при швидкостях 2...10 м/с цей ефект знижується й складає менше 1...5% [1].

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

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розподіл температурного поля у робочій ділянці сепараційного обладнання, в якій мають місце значні градієнти швидкостей і температур, описується диференціальними рівняннями, які розв'язуються кінцево-різницею методами. На практиці зазвичай використовують методи, що базуються на усередненні системи рівнянь у частинних похідних, які описують універсальні закони збереження маси, енергії, імпульсу в турбулентній системі [2]. Ця система повинна бути доповнена рівняннями стану, а також початковими і граничними умовами. Останнім часом здебільшого застосовують сучасні пакети прикладних програм типу Ansys, які дозволили числовим методом вирішувати складні практичні завдання газодинаміки. Для візуалізації гідродинамічної і теплової обстановки в елементах газоочисних пристроїв перспективним є метод голографічної інтерфероме-

трії [2]. Візуалізація потоку без порівняння з теоретичними розрахунками розглянута в працях [1, 2, 5]. Для верифікації отриманих даних становить інтерес комплексний підхід — одночасне виконання теоретичних розрахунків та їх підтвердження експериментом.

МЕТОЮ РОБОТИ є проведення експериментальних досліджень температурного поля в робочому каналі сепараційного обладнання з коагуляторами на розробленому стенді для визначення ефективності розділення двофазного середовища за рахунок термофоричних ефектів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Задача експериментального визначення температурного поля в сітковому коагуляторі 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. Використання оптичних методів для визначення тривимірного температурного поля також проблематичне.

Для одержання двовимірного температурного поля виготовлена модель сітки з тонкостінних мідних трубок, розташованих в одному напрямку. Ламінарний газовий потік, температура якого 110°C , рухається зі швидкістю 0,3 м/с перпендикулярно до площини теплообмінника.

Сітки у каналі охолоджуються до 20°C (діаметр сітки $d = 0,5$ мм, міжсіткова відстань $a = 0,5$ мм, канал із 4 рядами сітки). Така конструкція дозволяє одержати в потоці двовимірне температурне поле, що не має 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 температурне поле, яке при малих швидкостях потоку однозначно зв'язане з полем розподілу густини газу. Вважаючи газ при атмосферному тиску й температурі $T \geq 300$ К ідеальним, з рівняння Клапейрона–Менделєєва маємо:

$$T = \frac{\mu P}{\rho R}, \quad (1)$$

де μ — молярна маса; P , ρ — тиск та густина газу відповідно; R — універсальна газова стала.

З іншого боку, густина газу ρ зв'язана з його показником заломлення n співвідношенням Гладстона–Дейла

$$n - 1 = k\rho, \quad (2)$$

де k — стала Гладстона–Дейла.

Підставивши (2) у (1), одержимо залежність

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

Таким чином, вважаючи тиск P при малих швидкостях потоку сталим, одержимо температуру як однозначну функцію від показника заломлення $T = T(n)$.

Тоді зміна температури $\Delta T = \frac{dT}{dn} \Delta n$ або

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

де Δn — зміна показника заломлення газу при зміні його температури на ΔT .

Визначення Δn проведемо за допомогою інтерферометра, вважаючи, що його зондувальні промені поширюються по ізотермічних прямих лініях, уздовж яких значення n не змінюється. При зміні показника заломлення середовища на Δn у предметній світловій хвилі інтерферометра стосовно референтної з'явиться фазовий зсув, обумовлений різницею ходу променів [4]:

$$\Delta L = L\Delta n,$$

де L — довжина дослідної ділянки.

На картині інтерференції максимуми освітленості одержимо для областей,

в яких різниця ходу ΔL дорівнює цілому числу N довжин хвиль випромінювання λ . Тоді

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

$$\Delta T = \frac{k\mu P\lambda}{(n-1)^2 RL} N. \quad (3)$$

Залежність (3) зв'язує збільшення температури з порядком інтерференційної смуги на інтерферограмі. Знак «мінус» у залежності (3) опущений, тому що N визначається з точністю до знака.

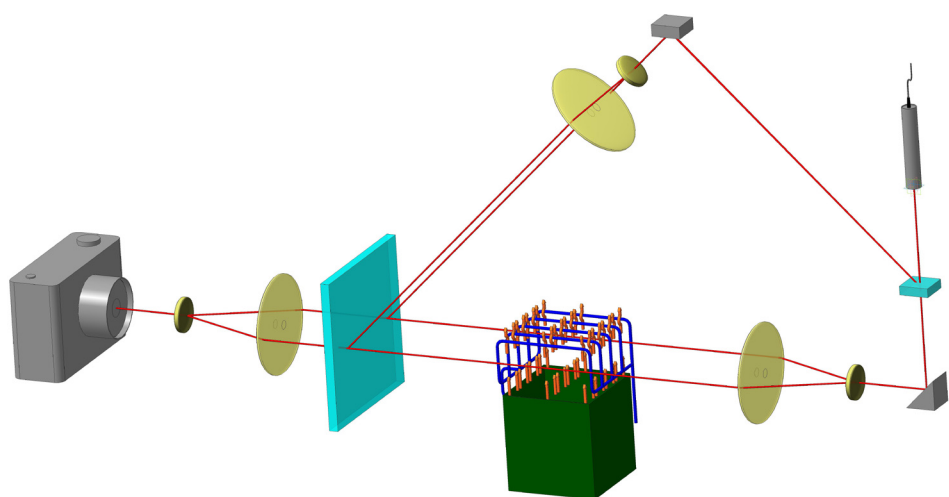
Приймаючи $k = 0,226 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, $P = 1,03 \cdot 10^3$ Па, $\mu = 29 \cdot 10^3$ кг/моль, $R = 8,3$ Дж/(моль·К), $n - 1 = 2,92 \cdot 10^{-4}$, $L = 5 \cdot 10^{-2}$ м, одержимо, що ціна однієї інтерференційної смуги складає 11 °С.

Оптична схема й опис установки.

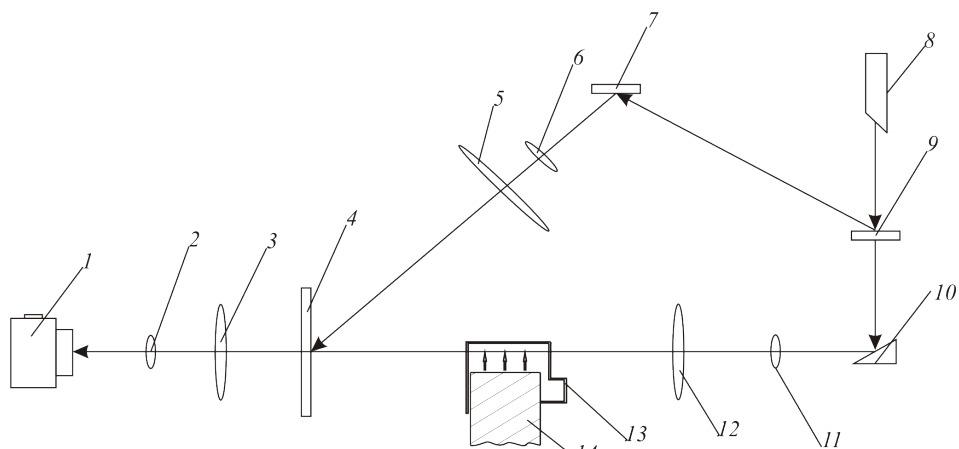
Експеримент проводився шляхом реєстрації інтерферограм у реальному часі. Оптична схема установки наведена на рис. 1.

Промінь оптичного квантового генератора 8 (гелієво-неоновий лазер ЛГН-215) направлявся на світлоділник 9 із коефіцієнтом відбиття 0,5. Відбитий від пластини промінь за допомогою дзеркала 7 і через систему лінз 5 та 6 формував опорний пучок. Промінь, що пройшов через світлоділник, відбивається від дзеркала 10 та за допомогою системи лінз 11 і 12 створює предметний пучок, який проходить через досліджувану область (сітчасту структуру) 13 та інтерферує з опорним на голограмі 4. Повітряний потік, створений компресором і нагрівачем, направлявся соплом 14 на досліджувану область. Зображення інтерферограми за допомогою лінз 2 та 3 проєктується на екран. Для реєстрації зображення при прибраному екрані використовується цифрова камера 1.

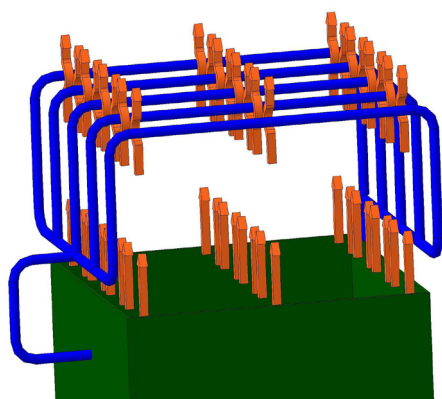
Програмний комплекс оцифрування інтерферограм вирішує завдання визначення кількості смуг N , що



a)



б)



в)

Рис. 1. Оптична схема установки: а, б — голографічна схема; в — модель сітки;

температура потоку $T_0 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$;
 температура стінки $T_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
 швидкість потоку $u_0 = 0,3 \text{ м/с}$;
 канал із $n = 4$ рядами сітки;
 діаметр сітки $d = 0,5 \text{ мм}$;
 міжсіткова відстань сітки $a = 0,5 \text{ мм}$

пройшла через кожний піксель зображення інтерферограми на кінограмі. Реконструкція вільної від паразитних смуг інтерференційної картини здійснюється методом комп'ютерної попиксельної обробки зображень у реальному часі [3]. Алгоритм зводиться до обчислення нормованого до одиниці значення яскравості кожного пікселя зображення зі співвідношення

$$I = 0,5(1 + \cos(N\pi)). \quad (4)$$

Необхідно виконати наступні основні етапи: виділення області обробки на кінограмі, нормалізацію яскравості смуг по всій кінограмі шляхом переведення кольорового зображення в градації сірого та підвищення контрастності, визначення кількості смуг, яка пройшла через кожну точку обраної області, побудову вільної від паразитних смуг інтерференційної картини згідно зі співвідношенням (4). Зовнішній вигляд інтерфейсу програми обробки показаний на рис. 2 [3].

Експериментальні дослідження. Якщо інтерферограма спостерігається

в смугах нескінченної ширини, то на ній візуалізуються лінії течій, що в ламінарному потоці являють собою ізотермічні лінії [2]. Така картина смуг при обтіканні нагрітим повітрям охолоджуваних елементів сіткової структури наведена на рис. 3. Визначення порядків смуг і обчислення значень температур ускладнюються двома обставинами.

По-перше, на інтерферограмі між предметною світловою хвилею та її голографічною копією практично завжди існує неконтрольований фазовий зсув як наслідок фотохімічної обробки й сушки фотошару. Він призводить до виникнення паразитних смуг, що спотворюють інформативну картину інтерференції (див. рис. 3, а).

По-друге, невизначеними є знаки номерів смуг і початок їх відліку. Усунути невизначеність знака вдається шляхом настройки інтерферометра на смуги скінченної ширини. Для цього опорна голограма повертається на невеликий кут навколо горизонтальної осі. На інтерферограмі виникає система паралельних горизонтальних опорних смуг,

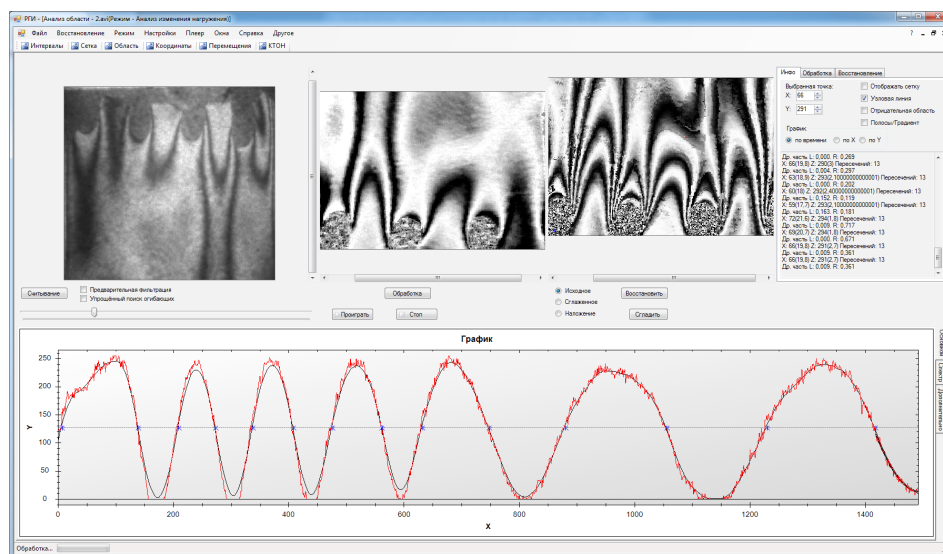


Рис. 2. Інтерфейс програми обробки

перпендикулярних до напрямку поширення повітряного потоку (рис. 4, *a*). При включенні нагрівача картина смуг переміщається й деформується відповідно до зміни температури. Після стабілізації температурного поля інтерферограма газового потоку приймає вигляд, наведений на рис. 4, *б*. Вона досить наочно ілюструє відносний розподіл температур по перетину потоку й дозволяє провести кількісну оцінку різниці температур у будь-якій його точці.

Визначення поля абсолютних значень температур за даною інтерферограмою не є можливим, бо вона не містить зображення незбурених ділянок

досліджуваного середовища. Крім того, залишається проблема похибки у визначенні порядків смуг, обумовлена паразитними смугами інтерференції.

Усунення проблем досягається шляхом обробки інтерферограм методом комп'ютерної попиксельної обробки зображень у реальному часі [3]. При малій швидкості ламінарного потоку зміна показника заломлення газу залежить тільки від температури. Тому номер інтерференційної смуги N у кожній точці інтерферограми дорівнює кількості смуг, що пройшла через неї при плавному підвищенні температури газу (якщо це підвищення є монотонним).

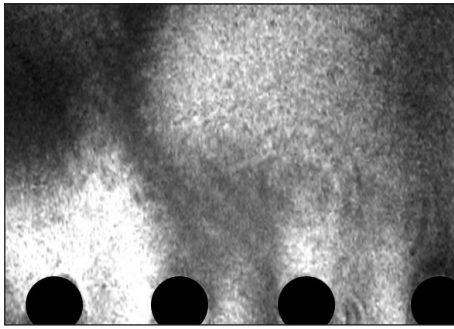
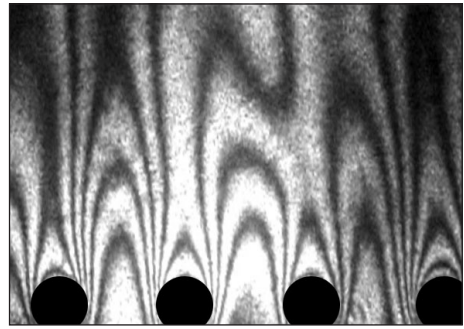
*a)**б)*

Рис. 3. Інтерферограма обтікання сіткової структури в смугах нескінченної ширини: *a* — при кімнатній температурі (спостерігається система паразитних смуг); *б* — при нагріванні повітря й охолодженні елементів сітки

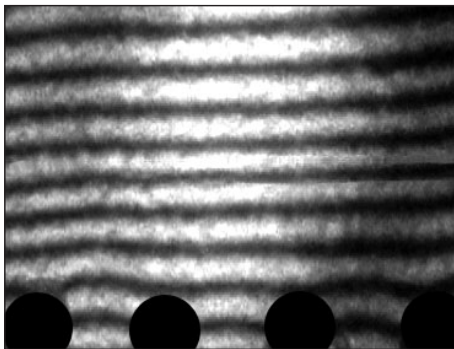
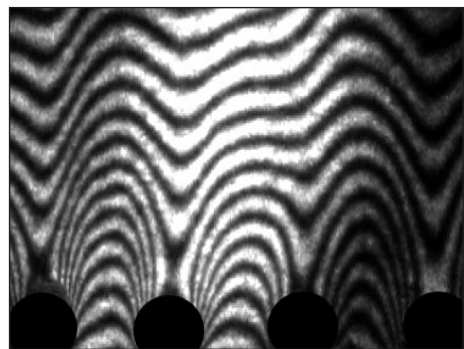
*a)**б)*

Рис. 4. Інтерферограма обтікання сіткової структури в смугах скінченної ширини: *a* — система опорних смуг при кімнатній температурі; *б* — при нагріванні повітря й охолодженні елементів сітки

Для того, щоб провести такий підрахунок, робиться відеозапис інтерферограми в реальному часі від моменту включення нагрівача до моменту стабілізації поля температур. Окремі кадри зафіксованого відеофайла наведені на рис. 5,

типий вигляд залежності яскравості пікселя від номера кадру кінограми — на рис. 6.

Порядок інтерференції N , що відповідає даному пікселю зображення інтерферограми, дорівнює кількості пері-

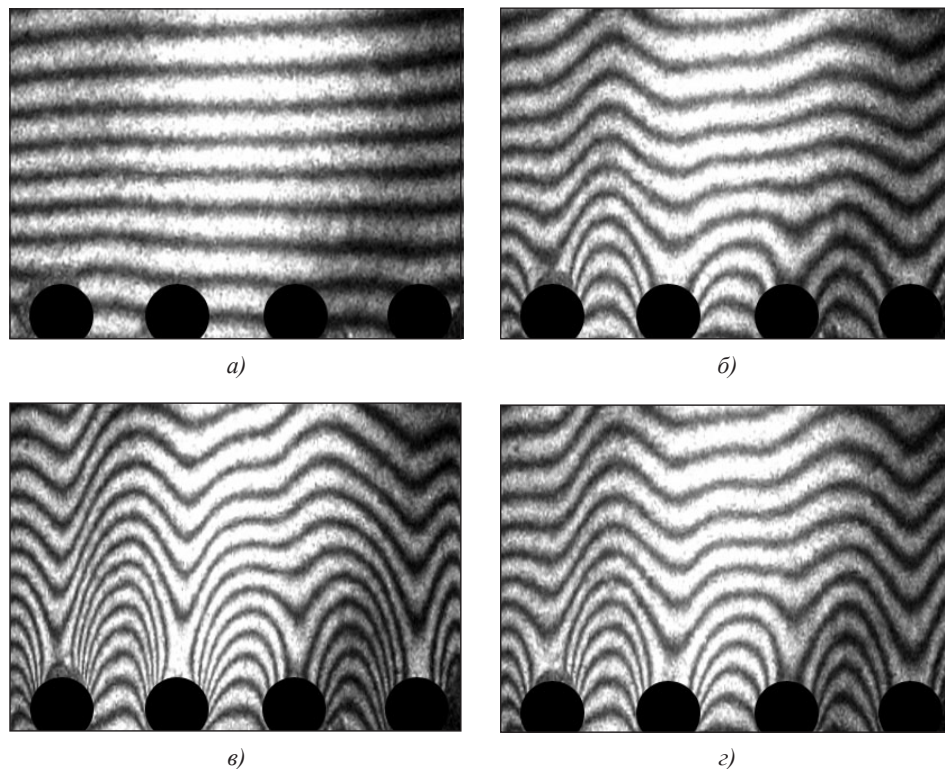


Рис. 5. Інтерферограми температурного поля на кінограмі: $a - t = 0$ с; $b - t = 4$ с; $v - t = 8$ с; $z - t = 16$ с

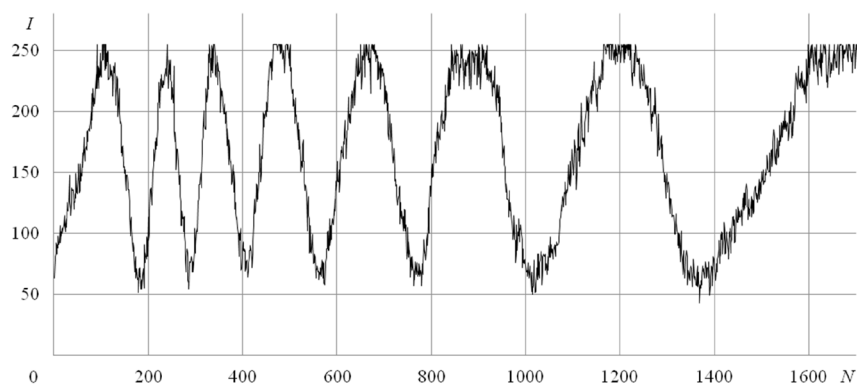
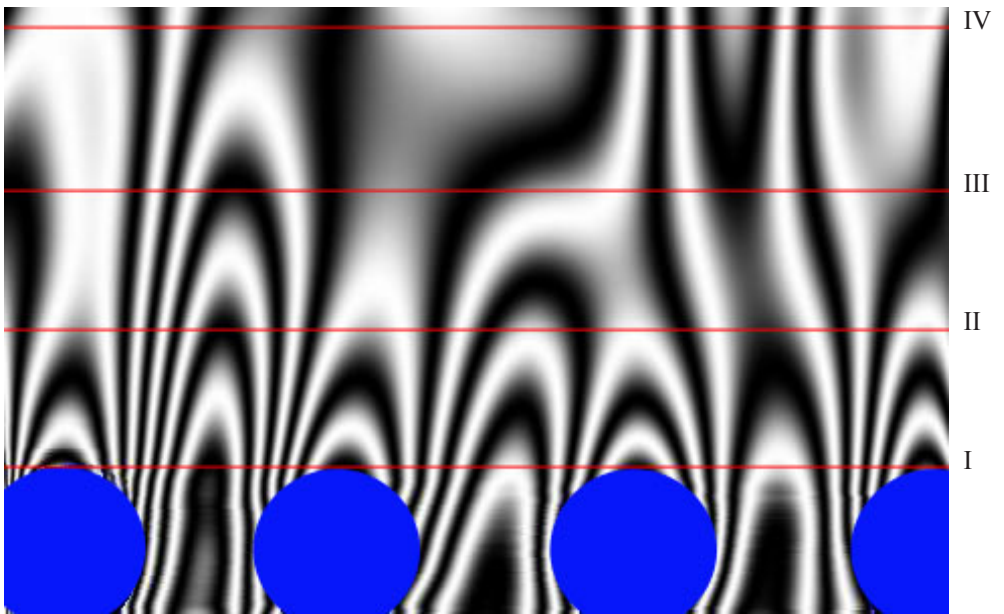
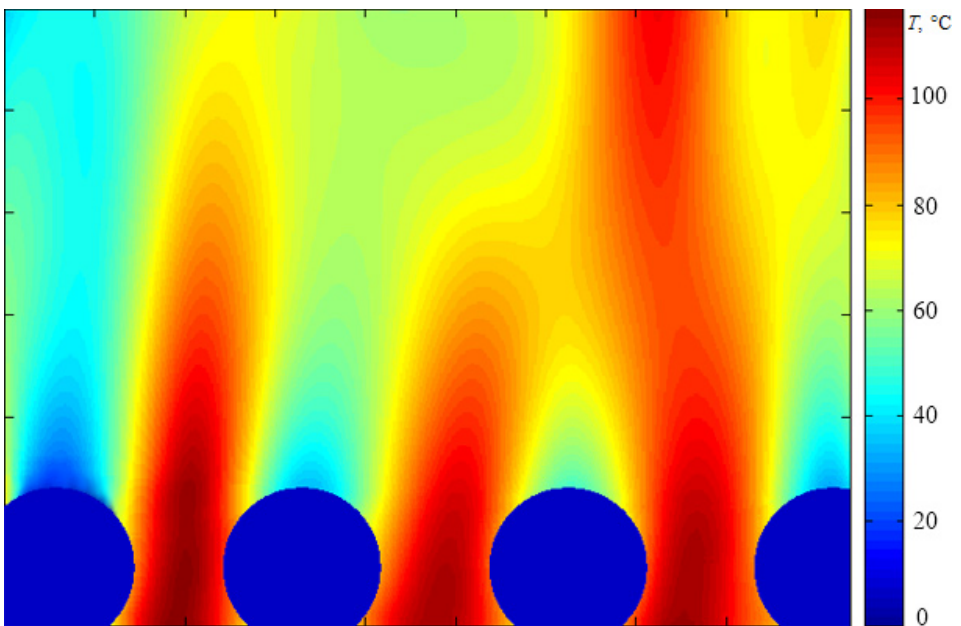


Рис. 6. Типовий вигляд залежності яскравості пікселя від номера кадру



a)



б)

Рис. 7. Результати комп'ютерної обробки інтерферограм: *a* — ізолінії поля температур; *б* — температурний градієнт отриманий за результатами розрахунків: I-IV — перерізи 1-4 відповідно

одів зміни яскравості на цьому графіку (див. рис. 6). Дана методика виключає вплив паразитних смуг на результат оцифрування інтерферограми, тому що при визначенні порядків смуг немає прив'язки до нульової смуги. Оцифрування може бути зроблене як у смугах скінченної, так і в смугах нескінченної ширини.

За кінограмою, елементи якої наведені на рис. 5, відповідно до даної методики проведено комп'ютерне відновлення (у смугах скінченної ширини) температурного поля в потоці нагрітого повітря, що обтікає охолоджені елементи сіткової структури (див. рис. 1). Згідно з викладеною методикою інтерференційні смуги відображають ізотермічні ділянки потоку із шагом 11 °С. Такі термограми дозволяють отримати візуалізацію неізотермічного потоку з високою просторовою роздільною здатністю в прилеглих шарах.

Результати експериментальних досліджень структури потоку слід зіставляти з розрахунками ізотерм потоку. При порівнянні результатів розрахунків полів температур з результатами голографічного експерименту встановлено, що отримані за допомогою кінозйомки термограми в достатній мірі збігаються з даними розрахунків, що підтверджує прийняту фізичну модель процесу. Невеликі відмінності обумовлені неідеальністю експериментальної моделі. Результат визначення поля температур наведений у вигляді набору ізоліній на рис. 7, а, діаграми температурного градієнта, отриманого в середовищі програмного забезпечення, — на рис. 7, б, а у вигляді графіків по окремих перерізах — на рис. 8.

Як видно з рис. 7 і 8, максимальний градієнт температури спостерігається на першому перерізі, який є максимально наближеним до поверхні осадження.

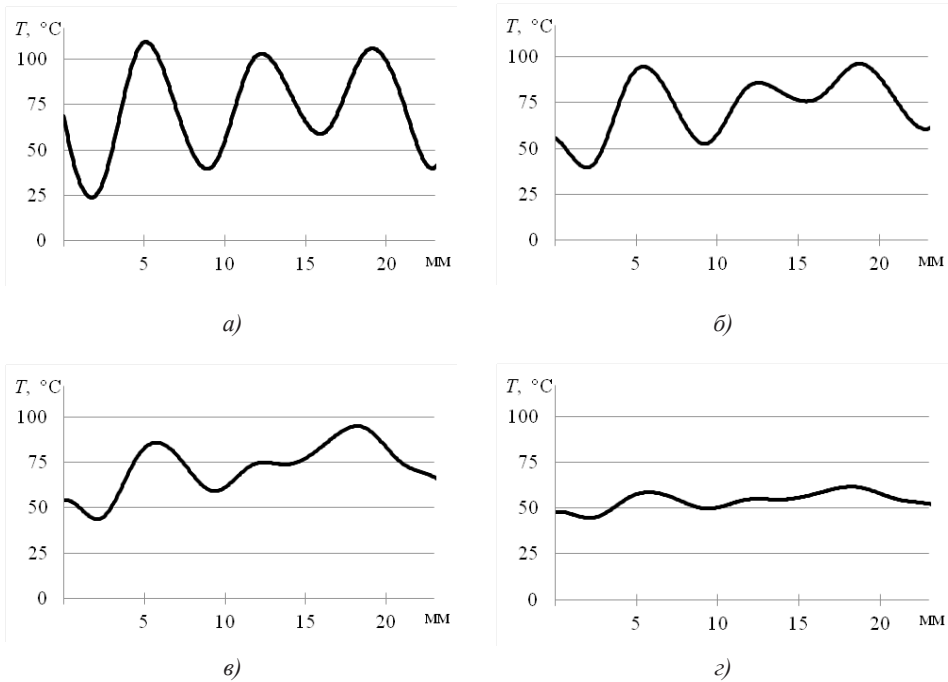


Рис. 8. Графіки розподілу температур в окремих перерізах: *a* — переріз 1; *б* — переріз 2; *в* — переріз 3; *г* — переріз 4

Температура шарів повітря над елементами сітки практично дорівнює температурі поверхні осадження (температура стінки $T_c = 20$ °С), а максимальна температура практично відповідає температурі потоку ($T_0 = 110$ °С). По мірі віддалення від сітки відбувається швидке вирівнювання температур унаслідок змішування шарів з холодним повітрям зовнішнього середовища — температура усереднюється і встановлюється на рівні 50 °С.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено робочий канал експериментальної установки для візуалізації полідисперсних течій у неізотермічних

умовах для елементів сепараційного обладнання методом голографічної інтерферометрії.

2. Проведено експериментальні дослідження температурного поля в робочому каналі сепараційного обладнання з коагуляторами на розробленому стенді для визначення ефективності розділення двофазного середовища за рахунок термофоричних ефектів.

3. Проаналізовано дані розподілу температурного газового потоку при температурі потоку $T_0 = 110$ °С, температурі стінки $T_c = 20$ °С і швидкостях потоку $u_0 = 0,3$ м/с у розрахунковому дослідному комплексі в каналі із 4 рядами сітки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Басок, Б. И.** Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании [Текст] / Б. И. Басок, С. С. Рыжков // Промышленная теплотехника. — 2003. — № 5. — С. 45–50.
- [2] **Вест, Ч.** Голографическая интерферометрия [Текст] / Ч. Вест — М. : Мир, 1982. — 504 с.
- [3] Исследование форм собственных колебаний элементов ГТД методом голографической интерферометрии в реальном времени [Текст] / М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотой, Д. В. Довгань, И. Ю. Жук // Авиационно-космическая техника и технология. — Харьков : НАУ ХАИ, 2011. — № 8 (85). — С. 51–56
- [4] **Письменный, Е. Н.** Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оробренных труб [Текст] / Е. Н. Письменный. — К. : Альтерпес, 2004. — 244 с.
- [5] **Рыжков, С. С.** Исследования газодинамики и теплопереноса турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии [Электронный ресурс] / С. С. Рыжков // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». — Миколаїв : НУК, 2010. — № 4. — Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.