

1. Калашиников И.Д., Степанов В.С., Чуркин А.В. *Адаптивные системы сбора и передачи информации*. – М., 1975. 2. Тихонов В.И. *Нелинейные преобразования случайных процессов*. М., 1986. 3. Iwakhiv O., Puchynski B., Shygera I., Velgan R., Ugolnikow A. *Adaptive two-dimensional field serving system. Materiały V międzynarodowego seminarium metrologów "Metody i technika przetwarzania sygnałów w pomiarach fizycznych"*. Rzeszow, 1997, S.173.

УДК 536.6

Дорожовець М.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

## РЕКОНСТРУКЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ТОПКАХ КОТЛОАГРЕГАТІВ

© Дорожовець М., 2000

**In this article the problems of reconstruction of the temperature fields in furnace power station are considered. The estimates of the methodical and instrumental errors for typical temperature distribution are presented.**

**1. Вступ.** Одним з найважливіших показників роботи топки котлоагрегату є температура продуктів спалювання на виході з топки, яка великою мірою визначає загальні техніко-економічні показники роботи котла, в тому числі надійність і безперебійність його роботи [1,2]. Зокрема, зменшення температури вихідних газів на 12-16 °С може підвищити коефіцієнт корисної дії котла приблизно на 1% [1].

Поле температур в топці загалом як по вертикалі, так і в горизонтальних перетинах має несиметричність. Максимальна температура досягається в ядрі факела, де вона наближається до адіабатної температури горіння, а на виході з топки вона мінімальна і нижча на 700-800 °С від максимальної. Різниця температур газового середовища в перетинах топки в області екранів може досягати 200-300 °С, а на виході з топки – 50-100°С [1,2].

Теплові процеси, що відбуваються в топках котлоагрегатів, можуть бути описані системою диференціальних і інтегро-диференціальних рівнянь. Однак розв'язування такої системи рівнянь надзвичайно утруднене внаслідок величезної кількості чинників, що визначають променевий та конвективний теплообмін за невизначених їх параметрах та крайових умовах. Тому на практиці застосовують спрощені і наближені методики розрахунку [1]. Однак об'єктивну інформацію про фактичний просторовий розподіл температури газового середовища в топці можна отримати, лише виконуючи відповідні вимірювання.

Крім економічних, надзвичайно важливим є забезпечення екологічних показників роботи котлоагрегатів, насамперед, впровадження заходів щодо зменшення концентрації оксидів азоту у відпрацьованих газах. Їх концентрація може досягати 2г/м<sup>3</sup>, що перевищує гранично допустимі норми. Для зменшення викидів стараються зменшити температуру топкових газів, особливо її локальних значень [1]. Однак зменшення температури газів може спричинити погіршення техніко-економічних показників котлоагрегату.

Отже, належне поточне вимірювання середньої та локальних температур газового середовища в котлоагрегатах є вкрай необхідною умовою досягнення високоефективних як економічних, так і екологічних показників їх роботи.

**2. Акустичний метод визначення температури.** Акустичний метод є найбільш придатним для вимірювання розподілу локальних температур в таких об'єктах значних роз-

мірів як топки котлоагрегатів [3-9]. Він ґрунтується на залежності акустичної швидкості від температури, зокрема в сумішах газів швидкість поширення акустичних хвиль залежить від концентрації компонент і достатньо добре описується виразом [3-9]

$$V = \sqrt{\frac{RT}{\sum_i x_i M_i} \cdot \frac{\sum_i x_i C_{p_i}}{\sum_i x_i C_{v_i}}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = K_\Gamma \sqrt{T}, \quad (1)$$

де  $R$  – газова стала;  $T$  – абсолютна температура;  $x_i$  – відносна концентрація  $i$ -ї компоненти газу ( $\sum_i x_i = 1$ );  $\gamma$  – відношення між питомою теплою при постійному тиску ( $C_p$ ) і об'ємі

( $C_v$ ) газу;  $M$  – молярна вага газової суміші, розрахована за молярними вагами  $M_i$  і відносними концентраціями  $x_i$  газових компонент;  $K_\Gamma$  – коефіцієнт, що залежить від складу та концентрацій газової суміші, сталий для цього газу (в котлоагрегаті склад газу і концентрації складових залежать від сорту палива і режиму його спалювання).

В акустичному методі безпосередньо вимірюють не швидкість, а інтервали часу поширення акустичних імпульсів вздовж шляхів  $l_j$  між передавачем і приймачем (рис.1).

$$t_j = \int_{l_j} \frac{dl_j}{V(x,y)} = \int_{l_j} W(x,y) dl_j, \quad (2)$$

де  $W(x,y) = V^{-1}(x,y)$  – інверсна функція до швидкості звуку- сповільнення.

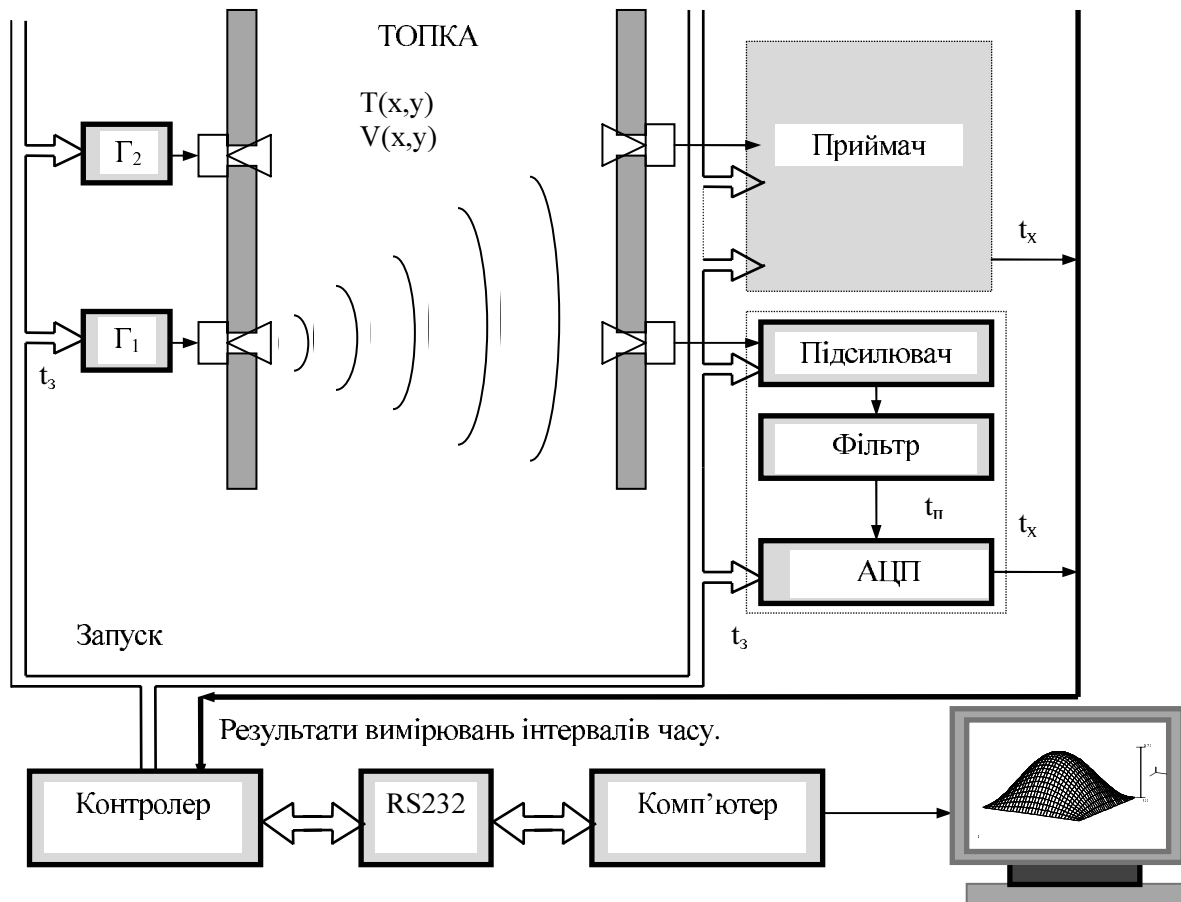


Рис.1. Схема акустичного вимірювання розподілу температури

Генератори (Г) та приймачі акустичних імпульсів розташовують у пристінній області топки котлоагрегату. Типово розміщують від 2-х до 4-х перетворювачів на одній стінці. Кожна пара акустичних перетворювачів утворює акустичний канал – вимірювальний шлях. Їх кількість залежить від кількості перетворювачів. Для 2-х перетворювачів на стінці разом є 24 канали, для 3-х – 54 і для 4-х – 96 каналів (часові інтервали між перетворювачами, що розміщені на одній стінці, не вимірюють). Контролер організовує синхронну роботу всіх пристроїв схеми. Приймачі, що включають підсилювач, фільтр і АЦП, формують результати вимірювань часових інтервалів, які збираються в пам'яті контролера. Після завершення повного циклу вимірювання (опитані всі канали) результати вимірювань через інтерфейс RS232 передаються в комп'ютер, де відбувається реконструкція температурного поля, розрахунок його характеристик (середньої, середньоквадратичної, мінімальної, максимальної температури, її градієнтів тощо) і здійснюється виведення результатів у необхідній формі.

**3. Реконструкція температурного поля.** Рівняння (2) є типовим рівнянням променевої томографії [10], в якому вимірювані величини (інтервали часу) пропорційні до середнього сповільнення вздовж шляху  $l_j$ . Задача відтворення температурного поля за результатами вимірювань часових інтервалів проходження акустичних імпульсів між різними парами акустичних перетворювачів називається оберненою задачею томографії [10]. Її переважно розв'язують на основі апроксимації сповільнення лінійною комбінацією відомих базових функцій  $\Psi_i(x,y)$  [4-10]:

$$W_a(x,y) = \sum_{i=1}^n C_i \Psi_i(x,y), \quad (3)$$

де  $C_i$  – невідомі коефіцієнти;  $n$  – кількість базових функцій

Вид апроксимації оберненої швидкості залежить від різних чинників, передусім вимагається простота розрахунку образу температури за результатами вимірювань, а також забезпечення допустимої методичної похибки відтворення розподілу температури. Вибравши базові функції, інтегруванням (3) в  $j$ -му напрямку можна розрахувати  $j$ -й очікуваний результат вимірювання:

$$t_j^c = \int_{l_j} W_a(x,y) dl_j = \sum_{i=1}^n C_i \int_{l_j} \Psi_i(x,y) dl_{ji} = \sum_{i=1}^n C_i R_{ij}, \quad (4)$$

тут  $R_{ij} = \int_{l_j} \Psi_i(x,y) dl_j$  – інтеграл від  $i$ -ї базової функції в  $j$ -му напрямку.

Після інтегрування вздовж усіх каналів ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) (рис.1), порівнюючи отримані вимірюванням (2) значення  $t$  до розрахованих  $t^c$  (4), отримують систему  $m$  лінійних рівнянь з  $n$  невідомими  $C_i$  ( $i = 1 \dots n$ ), яка в матричній формі має вигляд

$$\mathbf{CR} + \mathbf{e}_t = \mathbf{t}, \quad (5)$$

де  $\mathbf{C}$  – вектор невідомих коефіцієнтів при базових функціях розміром  $n$ ;  $\mathbf{R}$  – проекційна матриця розміром  $m \times n$ ;  $\mathbf{e}_t$  – вектор похибок вимірювань.

Коефіцієнти  $\mathbf{C}$  отримують, розв'язуючи (5) методом найменших квадратів (для мінімізації квадратів відхилень результатів вимірювань (2) і розрахованих значень (4))

$$\mathbf{C} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{t}. \quad (6)$$

Вони використовуються для розрахунку просторових значень оберненої швидкості  $W_p(x,y)$  і далі – температури

$$T_p(x,y) = (K_{\Gamma} W_p(x,y))^{-2}. \quad (7)$$

Як апроксимаційні найчастіше застосовують дискретні (кусково-сталі та площинні) і двовимірні поліноми (алгебраїчні, тригонометричні, Чебишова та ін.) [10]. Кількість базових функцій залежить від допустимої похибки апроксимації, а також обмежена як кількістю акустичних шляхів, так і вимогами отримання стійких розв'язків, тобто образів температурного поля. Річ у тому, що обернена задача томографії належить до класу некоректних задач [10,11]. У даному випадку некоректність проявляється в тому, що зі збільшенням кількості базових функцій (це загалом потрібно для зменшення похибки апроксимації), погіршується зумовленість матриці  $(R^T R)$  у (6), що призводить до різкого погіршення стійкості розв'язків, тобто до недопустимо великих похибок реконструкції [11]. Тому кількість членів апроксимаційної функції слід вибирати з компромісу між похибкою апроксимації та похибкою реконструкції.

Нами проведені дослідження залежності ступеня зумовленості (Cond.) реконструктивних матриць від порядку (n) апроксимаційних поліномів та кількості результатів вимірювань (рис.2). Порядок полінома однозначно визначає кількість його членів. Встановлено, що при 16-розрядному поданні десяткових чисел і при 24 вимірюваннях максимальний порядок алгебраїчного і тригонометричного поліномів  $n=4$  (15 членів алгебраїчного полінома і 13 членів тригонометричного). При 54 вимірюваннях максимальний порядок цих поліномів 6 (28 членів алгебраїчного полінома і 25 членів тригонометричного). А при 96 вимірюваннях найбільший можливий порядок 8 (45 членів алгебраїчного полінома і 41 членів тригонометричного). Двовимірні поліноми Чебишова забезпечують на декілька порядків менший ступінь зумовленості матриць, що сприяє кращій стабільності реконструйованого температурного розподілу. Збільшення порядку полінома, порівняно з вказаними, негайно спричиняє повну втрату стійкості, яку можливо покращити лише застосувавши

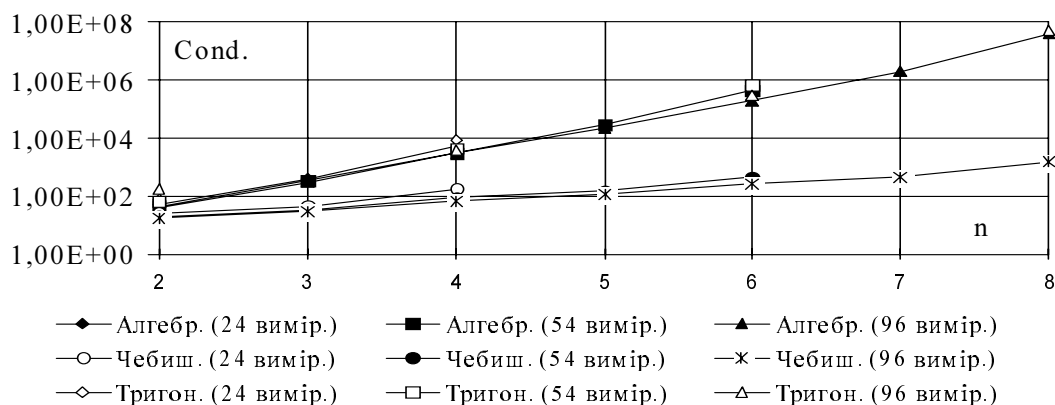


Рис.2. Ступінь зумовленості реконструктивних матриць

регуляризацію за Тихоновим. Правда, сумарна похибка (від апроксимації та від збурення) в цьому випадку все ж є більшою, ніж при граничних порядках поліномів.

**4. Результати реконструкції температурного поля.** Точність реконструкції була досліджена з використанням типового тестового температурного розподілу [4] (рис.3)

$$T_m(x,y) = 923 + 750 \cos(\pi x/L) \cos(\pi y/L), \quad K, \quad |x| \leq L/2, \quad |y| \leq L/2 \quad (8)$$

де  $L$  – розмір топki котлоагрегату (умовно прийнято, що топка має квадратний перетин).

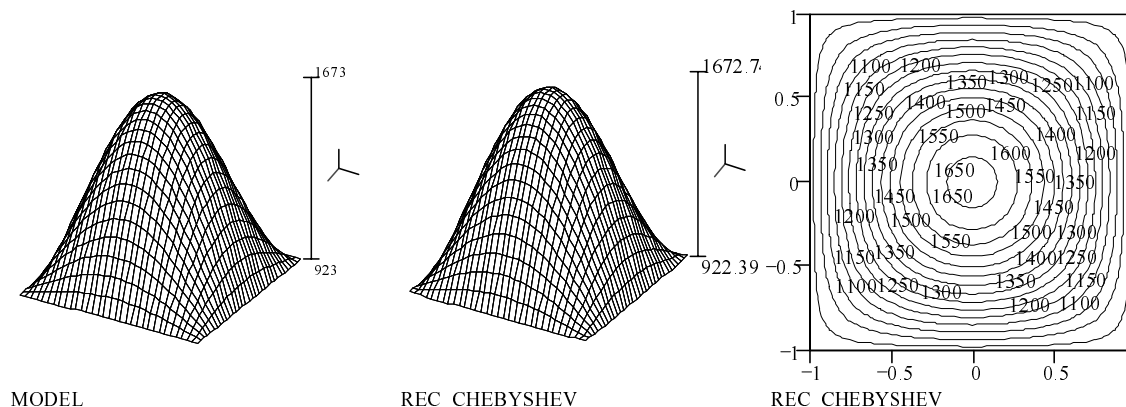


Рис.3. Тестова температурна модель і реконструйований образ (поліном Чебишова)

Значення часових інтервалів були розраховані, застосовуючи (8) до (1) і (2), причому модельні дані були отримані для 8,12,16 перетворювачів і 4,6, 8 порядків поліномів. За (6) були розраховані коефіцієнти при базових функціях, після підстановки яких у (7) були розраховані температурні розподіли  $T_p(x, y)$ . Якість реконструкції температурного поля оцінювалось зведеною (у відсотках) похибкою

$$\text{НАММА} = \gamma(x, y) = \frac{T_p(x, y) - T_m(x, y)}{T_m} \cdot 100\%, \quad (9)$$

де  $T_m=1673\text{K}$ , а також її просторові середнє і середньоквадратичне значення.

На рис.4 показані залежності зазначених характеристик похибок від порядків поліномів Чебишова і тригонометричного, а також від кількості результатів вимірювань. Ці результати отримані для 16 перетворювачів (по 4 рівномірно розміщених перетворювачах на одній стороні), 55 членів полінома Чебишова і 41 член тригонометричного полінома.

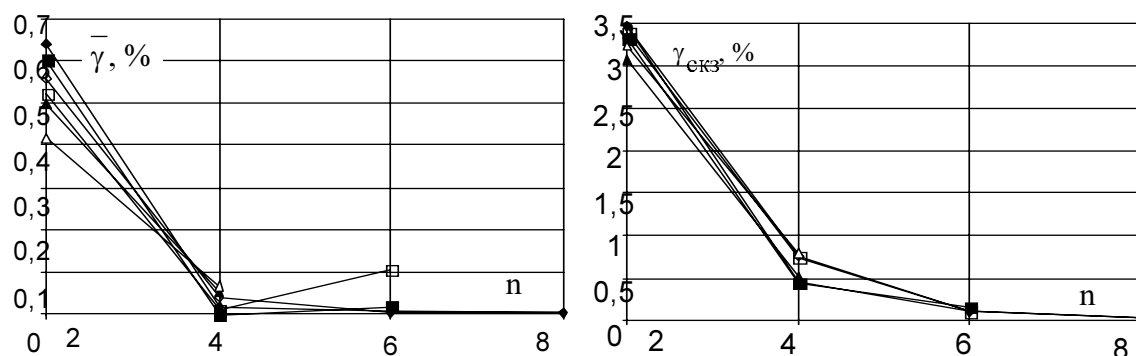


Рис.4. Середня і середньоквадратична похибки реконструкції

Як бачимо, що якщо найбільш інформативною є середня температура газового середовища в топці котлоагрегату, а локальні відхилення реконструйованої температури від фактичної не є критичними, то вже при порядках поліномів  $\geq 4$  (13 коефіцієнтів для

тригонометричного полінома і 15 – для полінома Чебишова) і кількості результатів вимірювань  $\geq 24$  (всього 8 вимірювальних перетворювачів) зведена середня методична похибка не перевищує  $\approx 0,1..0,2\%$ . Якщо ж важливими є локальні значення температури, то інтегральною характеристикою якості їх відтворення може бути середньоквадратична похибка. Для забезпечення її значення  $\leq 1..2\%$  порядок апроксимаційних поліномів має бути  $\geq 4..6$ , а кількість вимірювань  $\geq 24..54$  (всього 8-12 перетворювачів). Застосування 96 вимірювань (всього 16 вимірювальних перетворювачів) і апроксимаційних поліномів 8-го порядку з точки зору методичних похибок практично розв'язує завдання реконструкції температурних полів.

**5. Інструментальна похибка.** Крім методичних, на якість реконструкції впливають також інструментальні похибки. Вони зумовлені похибками вимірювання часових інтервалів. Нами отримано вираз для оцінювання характеристик інструментальної похибка  $\gamma_{\text{інстр}}(x, y)$  реконструкції температури

$$\gamma_{\text{інстр}}(x, y) = \frac{\Delta T_{\text{інстр}}(x, y)}{T_m} 100\% = -\frac{2t_n}{T_m} K_{\Gamma} \sum_{j=1}^m \eta_j(x, y) \gamma_{tj} = \alpha \sum_{j=1}^m \eta_j(x, y) \gamma_{tj}, \quad (10)$$

де  $\eta_j(x, y) = T^{1.5}(x, y) \sum_{i=0}^n \text{REC}_{i,j} \Psi_i(x, y)$  – коефіцієнти, які не залежать від похибок вимірювання;  $\gamma_{tj}$  – зведена похибка вимірювання часового інтервалу;  $t_n$  – нормувальне значення часу (звичайно  $t_n = t_{\text{max}}$ );  $\alpha = -2K_{\Gamma} t_n / T_m$ . Коефіцієнти  $\eta_j$  визначено з використанням (3) і (4). На рис.5 показані теоретична і експериментальна залежності відношення середньої

вимірювання;  $\gamma_{tj}$  – зведена похибка вимірювання часового інтервалу;  $t_n$  – нормувальне значення часу (звичайно  $t_n = t_{\text{max}}$ );  $\alpha = -2K_{\Gamma} t_n / T_m$ . Коефіцієнти  $\eta_j$  визначено з використанням (3) і (4). На рис.5 показані теоретична і експериментальна залежності відношення середньої

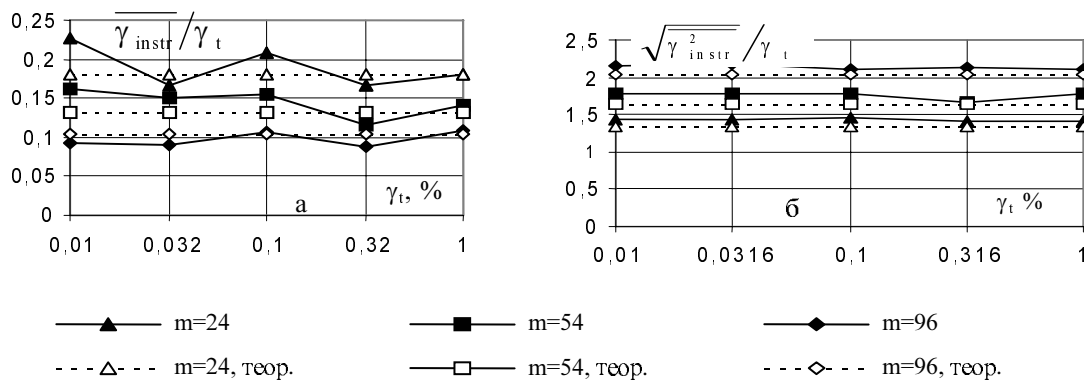


Рис.5. Інструментальна похибка: а – середня, б – середньо-квадратична

і середньоквадратичної інструментальної похибок відтворення температурного поля до похибки вимірювання часових інтервалів. Отже, щоб отримати стійкий образ температурного розподілу похибка вимірювання часових інтервалів має бути меншою за  $0.03\% ..0.1\%$ .

1. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. *Котельные установки промышленных предприятий: Учебн. для вузов.* М., 1988. 2. Блох А.Г. *Тепловое излучение в котельных установках.* Л., 1967. 3. Green F. *An Acoustic Technique for Rapid Temperature Distribution Measurement // J.Acoustic Soc.Am.* 1985. Vol.77. No.2. P.759-763. 4. Schwarz A. *Acoustic Measurement of Temperature and Velocity Fields in Furnaces // Tomographic Techniques. Proceeding ECAPT-92. Manchester, UK, 3/1992. P.381-389.* 5. Mayers P.E., Beesley M., Martine

- D.D. Ultrasonic Imaging in Large Gas and Liquid Processing Wessels. Process Tomography // A Strategy for Industrial Exploitation-3. UMIST, Manchester. UK. P.354-358.*
6. Дорожовець М.М. Фізичні принципи побудови вимірювальних томографічних систем для промислового застосування // *Вимірювальна техніка та метрологія*. 1996. Вип.52. С.113-121.
7. Dorozhovets M., Kouzii A., Stadnyk B. *Mathematical Aspects of Measurement of Temperature Fields in Gases and Flames // VDI/VDE Gesellschaft Mess-und Automatisierung Technik, TEMPERATUR'92 Tagung, Dusseldorf, Oct.1992.*
7. Dorozhovets M., Kouzii A., Stadnyk B. *The Measurement of Temperature Field by Ultrasonic Computer Tomography Methods, IMEKO TC-4: International Symposium On Intelligent Instrumentation For Remote And On-Site Measurements, Brussels, 1993.*
8. Dorozhovets M., Dudykevich T., Kouzii A., Stadnyk B. *The measurement system for the temperature field in gaseous environment 5th International Symposium on Temperature and Thermal Measurement in Industry and Science. Tempmeko'93. Prague, 1994.*
9. Dramanti M., Salerno E.A., Tonazzini A. and others. *An Acoustic Pyrometer System for Tomographic Thermal Imaging in Power Plant Boilers. IEEE Trans // On Instrumentation and Measurement. 1996. Vol.45. No.1. P.159-167.*
10. Дорожовець М.М. Математичні проблеми реконструкції образів в технічній томографії // *Вимірювальна техніка та метрологія*. 1998. Вип.53. С.3-21.
11. Деннис Дж., Шнабель Р. *Численные методы безусловной минимизации и решения нелинейных уравнений / Пер. с англ. – М., 1988.*