

# ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.382

## ОДНОСМУГОВИЙ БАГАТОКАНАЛЬНИЙ СВІТЛОВИДНИЙ ЗОНД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОЛУМ'Я

© Олександра Готра, Вольдемар Вуйцік, Цезар Войцеховський, Анджей Котира,  
Павел Комада, Анджей Смоляж, Богдан Стадник, 2000

Люблінська політехніка, кафедра електроніки, вул. Надбистржицька, 38, Люблін, Польща,  
Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка",  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Описано використання багатоканального світловодного зонда для вимірювання температури пірометричним методом. Наведені також результати вимірювання розподілу температур в процесі горіння поблизу пальника котла ОР-650.*

*Описано использование многоканального зонда для измерения температуры пиротермическим методом. Приведены также результаты измерения распределения температур в процессе горения вблизи пальника котла ОР-650.*

*We describe utilization of the multichannel optical-fibre probe as an optical-fibre pirometer. Some example temperature distributions taken from ОР-650 power boiler are also attached.*

### 1. Вступ

Світловодні засоби хоч і порівняно молода галузь термометрії, але така, що розвивається достатньо швидкими темпами. Ці засоби використовуються як для контактного контролю і вимірювання температури [1,2], так і для безконтактного [3], наприклад, у вигляді двоканальних пірометричних перетворювачів спектрального відношення [4]. Завдяки специфічним властивостям світловодів пірометри цього типу витісняють навіть імерсійні пірометри [3,5]. Це особливо важливо у тих випадках, коли об'єкт вимірювання знаходиться поза зоною прямої видимості, наприклад, у випадку вимірювання температури полум'я в енергетичних котлах, обладнаних трохи піднятими пальниками.

До найважливіших переваг світловодних пірометрів належать:

- незалежність пропускання світловоду від дії електромагнітних полів,
- малий діаметр світловоду, який дає можливість виконати вимірювання без збурень температурного поля об'єкта,
- можливість контактування з частинами об'єкта, що знаходяться під напругою,
- інертність світловоду до хімічних і механічних факторів,

- можливість з'єднання кількох світловодів з одним приймачем вимірювання (багатоканальне вимірювання);
- незначна стала часу перетворювача;
- широкий діапазон вимірювання (приблизно від – 200 до +2000°C) залежно від конструкції вимірювального приладу і конструкції світловоду [2,3,5],
- порівняно великі довжини світловоду, що дозволяє вимірювати температуру віддалених об'єктів, які знаходяться у важкодоступних місцях, в т. ч. в агресивних середовищах [1-5].

На кафедрі електроніки Люблінської політехніки впродовж багатьох років проводяться дослідження світловодних систем моніторингу полум'я у енергетичному котлі. Нижче розглянуто можливість використання таких систем у вигляді односмугового багатоканального світловодного зонда для контролю і вимірювання температури.

### 2. Схема вимірювального зонда

На рис.1 наведено функціональну схему вимірювання температури одноканальним світловодним зондом та найважливіші функціональні спектральні і енергетичні залежності для основних використовуваних вузлів: світловод; світловод – приймач випромінювання; приймач випромінювання.

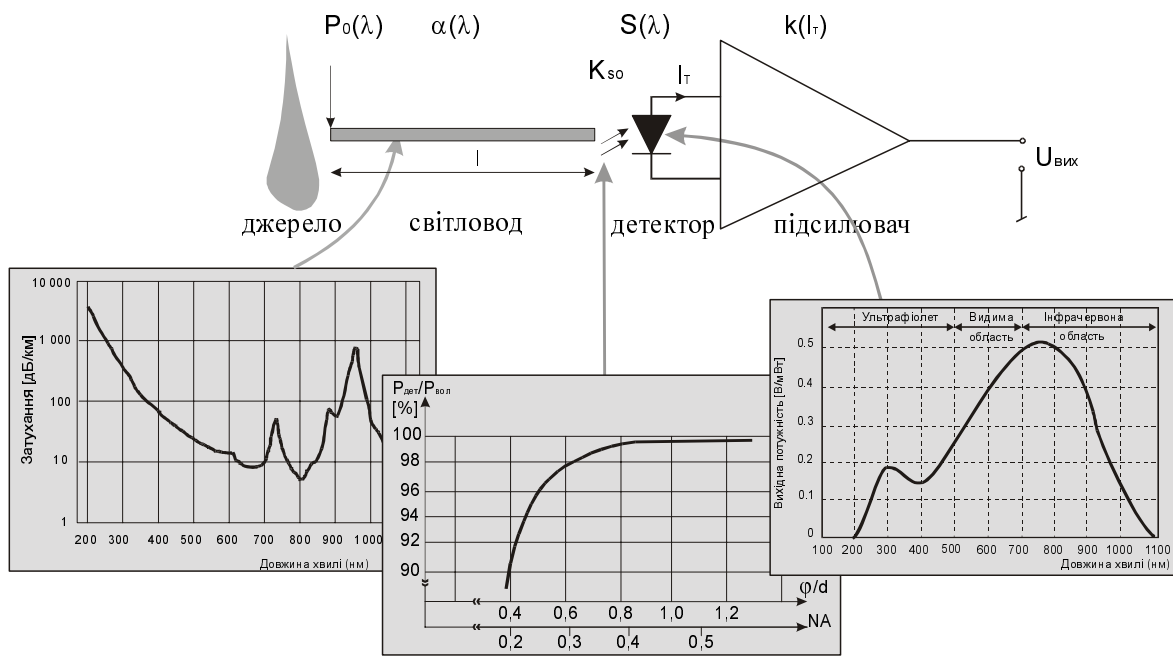


Рис. 1. Схема вимірвального зонда та спектральні співвідношення його основних вузлів

Схема вимірювання складається із світловоду з довжиною  $l$  і спектральною характеристикою загасання  $\alpha(\lambda)$ , детектора із спектральною характеристикою чутливості  $S(\lambda)$  і підсилювача вимірювання з коефіцієнтом підсилення  $k(I_T)$ . Питання передачі енергії від об'єкта до світловоду у цій статті не розглядаються, тому що детальний аналіз цієї проблеми представлений в [6].  $K_{so}$  – коефіцієнт передачі вузла “світловод – приймач випромінювання” (детектор);  $P_{det}$  – потужність прийнята детектором;  $P_{fiber}$  – потужність на виході світловоду

$$K_{so} = P_{det} / P_{fiber} \quad (1)$$

### 2.1. Світловод

У світловодному зонді, на відміну від класичного пірометра випромінювання [3,7], вихідний сигнал приймача випромінювання залежить від втрат у волокні. Основними складовими втрат енергії у волокні світловоду є: розсіяння Релея, втрати у інфрачервоній і ультрафіолетовій області і хвильові втрати. Сумарні втрати енергії можна виразити таким рівнянням:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_R(\lambda) + \alpha_{UV}(\lambda) + \alpha_{IR}(\lambda) + \alpha_F(\lambda) \quad (2)$$

або

$$\alpha(\lambda) = A\lambda^{-4} + B_1 e^{B_2 \lambda^{-1}} + C_1 e^{C_2 \lambda^{-1}} + D \quad (3)$$

- розсіяння Релея

- $\alpha_R(\lambda) = A\lambda^{-4}$ ; (4)

- втрати в ультрафіолетовій області

- $\alpha_{UV}(\lambda) = B_1 e^{B_2 \lambda^{-1}}$ ; (5)

- втрати в інфрачервоній області

- $\alpha_{IR}(\lambda) = C_1 e^{-C_2 \lambda^{-1}}$ ; (6)

- хвильові втрати

- $\alpha_F(\lambda) = D$ ; (7)

$A, B_1, B_2, C_1, C_2, D$  – постійні.

Спектральна характеристика загасання в  $dB/km$  використовуваного світловоду наведена на рис.2.



Рис. 2. Спектральна характеристика загасання використовуваного світловоду

**2.2. Вузол з'єднання світловоду з детектором**

Місце з'єднання з детектором може бути джерелом додаткових втрат оптичної потужності, що викликає зниження його вихідного сигналу. Основною причиною цих втрат є розбіжність оптичного променя, що падає на детектор. Коли на детектор падає розбіжне випромінювання, що надходить із світловоду, необхідно врахувати його чутливість до діагонального випромінювання. Відбивання від поверхні детектора збільшується із зростанням кута розбіжності світлового променя. З іншого боку, для такого випромінювання шлях абсорбції у кристалі детектора є довшим з кращою абсорбційною віддачею. Обидва ці явища значною мірою добре узгоджуються одне з одним. Наприклад, для кремнієвого детектора чутливість є постійною у межах ±0,3% для кутів падіння (0-15°) і падає до 1% при ±20° [9].

Числова апертура детектора є залежною від кутової характеристики світловоду. На рис.3 наведена залежність коефіцієнта передачі вузла "світловод-детектор" від числової апертури детектора NA і відношення діаметра чутливого майданчика детектора Ф до відстані d між вказаним майданчиком і вихідним торцем світловоду, коли джерелом випромінювання є градієнтний світловод 50\125 з числовою апертурою NA= 0,2.

Для розглянутого вузла "світловод-детектор" при числовій апертурі світловоду NA= 0,2 і фотодетектора NA=0,5 коефіцієнт передачі енергії через вузол за умови дотримання відповідного відношення між відстанню до світловоду d і діаметром детектора Ф може бути вищим за 99%. Звідси випливає, що для Ф/d ≥ 1 коефіцієнт передачі K<sub>so</sub>=P<sub>det</sub>/P<sub>fiber</sub> приблизно дорівнює одиниці.

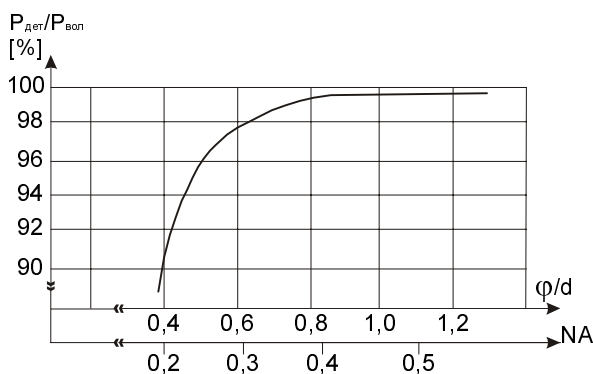


Рис. 3. Вплив числової апертури детектора і відстані світловоду від нього на коефіцієнт передачі вузла "світловод-детектор"

**2.3. Вибір приймача випромінювання**

З огляду на вибраний за рис.2 робочий спектральний діапазон (200÷1100) нм типовим детектором може бути кремнієвий фотодіод.

Використовуючи закон Планка для спектрального діапазону випромінювання, що потрапляє на фотодетектор у припущенні 100% квантової віддачі, фотострум можна виразити як [3,4]:

$$I_T = g \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{C_2 e^{\lambda T} - 1} d\lambda \tag{8}$$

де g – інтегральна струмова чутливість, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> – сталі закону Планка, λ – довжина хвилі, T – температура.

Фотострум для вузла "світловод-фотодетектор" визначає залежність:

$$I_T = g \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) K_{SO} S_{EF} e^{-\alpha(\lambda)L} d\lambda \tag{9}$$

де P(λ) – спектральна густина потужності на вході світловоду, що визначається законом Планка, S<sub>EF</sub> – ефективний спектральний відгук фотодетектора, L – довжина світловоду.

У рівняннях (8) і (9) границі інтегрування λ<sub>1</sub> і λ<sub>2</sub> на практиці означають діапазон спектральної чутливості фотодетектора і границі емісійності джерела. В роботі був використаний кремнієвий фотодетектор в інтегральному виконанні з підсилювачем, що має типову спектральну характеристику. Припускаючи, що напруга живлення і опір кола є постійними, фотострум, що протікає по колу після скерування світловоду на абсолютно чорне тіло з температурою T, може бути визначений приблизною залежністю [3,4]:

$$I_T \approx AT^n \tag{10}$$

де A – стала, n – показник степеня, що залежить від робочого спектрального діапазону та діапазону вимірювання температури.

Якщо робочий спектральний діапазон зменшується, показник n зростає, зате A зменшується. Із зростанням одночасно звужується діапазон вимірювання підсилювача.

**2.4. Вибір підсилювача**

Для розширення динамічного діапазону вимірюваної температури було використано логарифмічний підсилювач. Вихідна напруга логарифмічного підсилювача є залежною від відношення вхідних струмів і виражається рівнянням:

$$V_{OUT} = k(I_T) = B \log \frac{I_T}{I_2} \quad (11)$$

де  $I_T$  – вимірюваний фотострум,  $I_2$  – опорний струм,  $B$  – коефіцієнт підсилення.

### 3. Світловодний зонд як пірометр випромінювання

Використовуючи формули (10) і (11), вихідну напругу можна записати:

$$V_{OUT} = B \log \frac{AT^n}{I_2} \quad (12)$$

Приймаючи позначення  $K_1 = Bn$  і  $K_2 = \frac{A}{I_2}$  вихідну напругу можна записати у вигляді:

$$V_{OUT} = B \log K_2 + K_1 \log T \quad (13)$$

звідси вимірювана температура дорівнює:

$$T = \frac{10^{\frac{V_{OUT}}{K_1}}}{K_3} \quad (14)$$

де

$$K_3 = 10 \frac{B \lg K_2}{K_1} \quad (15)$$

З цього випливає, що після відповідного масштабування світловодний зонд може бути використаний для вимірювання температури, виконуючи основну функцію пірометра випромінювання.

### 4. Результати вимірювань за допомогою зонда

На рис.4 показаний спосіб розміщення світловодного зонда в котлі при вимірюванні температури газового полум'я з характерними його зонами.

Вимірювання розподілу температур виконано за допомогою багатоканального зонда, що був поміщений в отворі, перпендикулярному до осі пристінного паль-

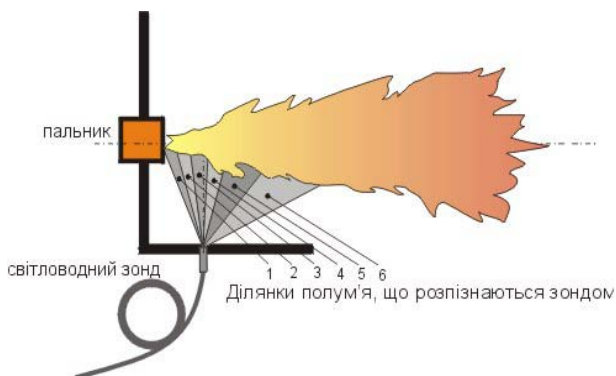


Рис. 4. Спосіб розміщення зонда у котлі та характерні зони полум'я

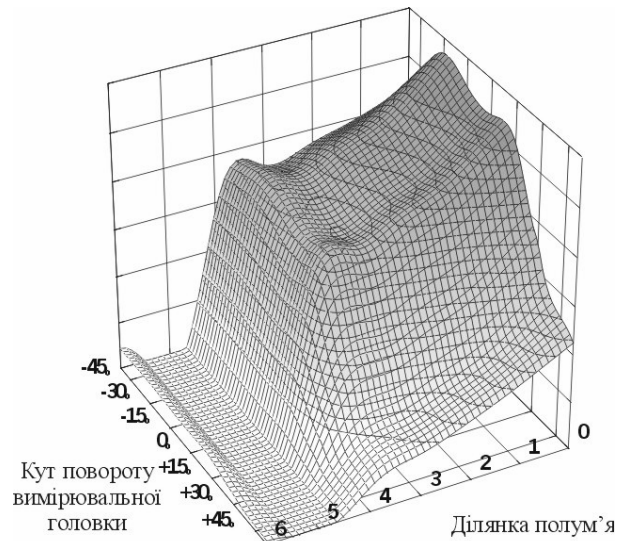


Рис. 5. Просторовий розподіл температур поблизу пальника

ника у котлі ОР-650. Результати вимірювань температури за допомогою описаного зонда наведено на поданих нижче рисунках. На рис.5. наведено просторовий розподіл температур поблизу пристінного пальника. Рис.6. ілюструє зміну поля температур під час зменшення притікання повітря до пальника, де світлішою фарбою показані вищі температури. З рис.6 видно, що температура у вказаних зонах від 1 до 6 (рис.4) стрімко падає. Зокрема в зоні 3, де спостерігається найнижча температура, з'являються термічні окисли азоту.

Отже, за допомогою світловодного зонда здійснюється діагностика газового полум'я пристінних пальників в котлі.

### 5. Висновки

Проведений аналіз і результати вимірювань, здійснених у промислових умовах в енергетичному котлі типу ОР-650, обладнаному зономісійними пристінними пальниками, дозволяють сформулювати такі висновки:

- світловодний зонд моніторингу полум'я може виконувати роль пірометра;
- описаний багатоканальний зонд дозволяє отримати неперервне одночасне вимірювання розподілу температури полум'я у шести його зонах;
- застосований у зонді ширококутовий детектор і важкі умови вимірювання, зокрема запылення, не дозволяють отримати високу точність вимірів розподілу температури полум'я;

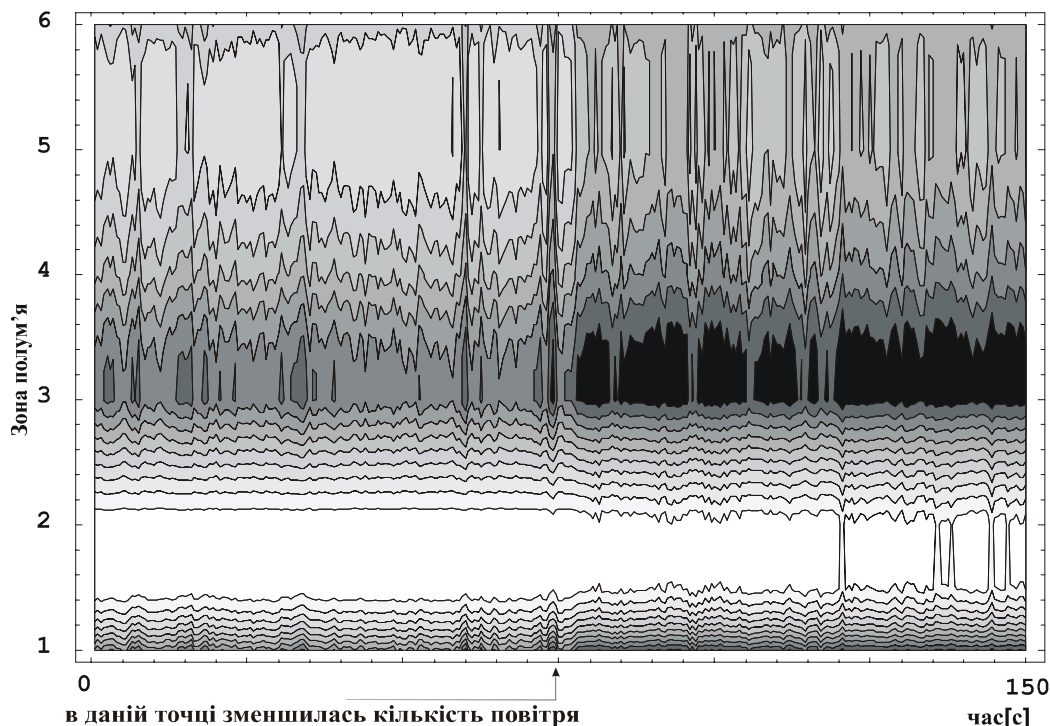


Рис. 6. Розподіл температури в часі в зонах полум'я при зменшенні притоку повітря

- для покращання точності вимірювань були проведені роботи із конструювання світловодного дво-смугового пірометра, що при глибшому дослідженні метрологічних характеристик зонда дозволить нормувати основну та додаткові його похибки.

1. Засименко В., Зорій В., Антонюк Р. Дослідження світловідних термоперетворювачів – прямих заміників платинових терморпар. В кн.: Транспортвання, контроль та облік тепlopостачання-Львів. 1998. С.260-267. 2. Zasyenko V., Stoliarchuk P., Bychkivskij R. Light Conduit thermal converters for metal and glass temperature measurement // 44 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium.-Ilmenau-September, 20-23, 1999, band 2, P.284-288. 3. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria, przyrządy i metody, 1998. 4. Засименко В. Двоканальні пірометричні перетво-

рювачі спектрального відношення з прямим відліком температури // Вісник ДУ "Львівська політехніка, 1998. № 324. С.77-82. 5. Засименко В., Лях В. Термоперетворювач / Пат. України, №16999А, 1997. Бюл.№4. 6. Krolopp W.J., Wójcik W., Kotyra A., Przytucki S., Smolarz A.: The light source to optical fibre coupling // Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej-Elektryka zeszyt 90, 1998. P. 5 – 38. 7. Zasyenko V., Salo O., Stoliarchuk P. A Method of Calibration and Transferring the High Temperature Scale for fiber – optic Pyrometers // The 7 International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science. Tempmeko 99 Abstracts 1-3 June, 1999, Delft P.178. 8. Krolopp W.J., Miskowicz J., Wójcik W.: Mathematical models of basic elements in an electro-optical system designed for sparkless feeding of small power receivers with electrical energy // Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej-Elektryka zeszyt 89. P. 95 – 124. 9. Becker J.: Detectors for optical power measurements // Hewlett Packard Journal, February, 1997.