

Висновки

1. Досліджувана система автоматичного регулювання може використовуватися для контролю і регулювання температури арматури, яку нагрівають в закритих каналах.
2. Для підвищення точності регулювання доцільно мати дослідні значення залежності струму нагріву арматури від температури для відповідних умов технологічного процесу.

1. Атаев С.С., Золотницький В.А., Бондарик Н.Д. и др. *Технология строительного производства*. – М., 1975. 2. Прикін Б.В., Бориц І.М., Коробкова О.М. *Арматура і арматурні вироби у виробництві збірного залізобетону*. – К., 1973. 3. Гнідець Б.Г., Завадяк П.П., Щеглюк М.Р. *Залізобетонні конструкції з електротермічним попереднім напруженням при монтажі*. – К., 1996.

УДК 535.36

Вуйцік В., Готра З.*

Люблінський політехнічний інститут, електричний факультет, кафедра електроніки,
*ДУ “Львівська політехніка”, кафедра електронних приладів

СВІТЛОВОДИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ РОБОТИ ПИЛОВОГО ПАЛЬНИКА

© Вуйцік В., Готра З., 2000

In this work light guides transmissive properties are described, the problems of their connection with thermal sources are considered, the device construction, which serves for a burner control, is elaborated and the results of experimental measuring on industrial object by the apparatus of original design are shown.

Вступ. Важливим, хоча дещо недооціненим фактором, що покращує процес спалювання в енергетичних котлах, є безпосередній контроль полум'я у пальнику. Тут можуть бути застосовані рішення, які використовують прилади для показу картини вибраної області полум'я на дисплеї, а також оптичні чи світловодні сенсори для оцінки роботи пальника на підставі змін інтенсивності та пульсації цієї області. Кожне з цих рішень може бути використане у системі керування. Сигнали, отримані з цих приладів, є найшвидшими з

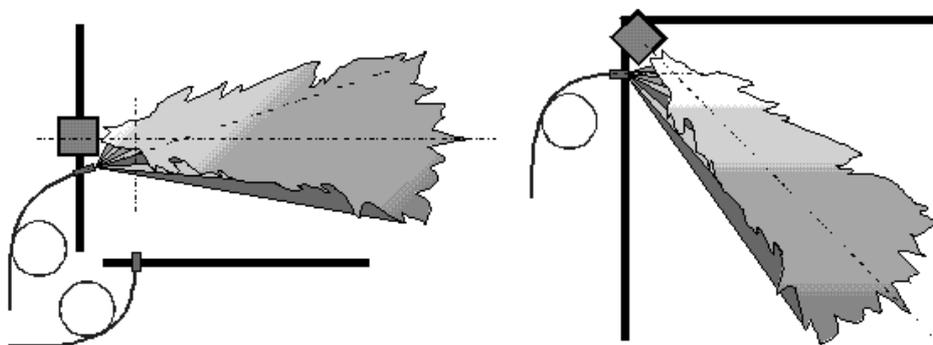


Рис.1. Приклади розташування світловодних зондів у котлах з настінними і кутовими пальниками

можливих у застосуванні і незначною мірою усереднені (залежні від величини просторового кута зору). Світловодні сенсори характеризуються великою еластичністю, можливістю одночасного аналізу кількох областей полум'я, стійкістю до завад, гальванічною і термічною ізоляцією електронних приладів перетворення, відносно низькою вартістю та ін. Світловодний сенсор, на відміну від інших, може працювати у положенні від кількох градусів до 90° відносно осі пальника. Він також може бути застосований у настінних і кутових пальниках (рис.1).

Істотний вплив на параметри світловодних сенсорів мають види застосованих світловодів і джерел світла для них. Проектуючи світловодні сенсори, необхідно враховувати оптичні властивості світловолокон і способи їх з'єднання з джерелами світла.

1. Світловод як трансмісійне робоче тіло. Передавання світла за допомогою світловоду полягає у передаванні оптичного сигналу осердям скляного волокна. Поширення світла у світловоді відбувається у внутрішній частині волокна осердя на основі явища повного внутрішнього відбивання на межі діелектричних середовищ з різними коефіцієнтами заломлення. Світловоди характеризуються невеликим загасанням оптичного сигналу (близько 1 дБ на кілометр) і довільною формою. Поширення світла у світловоді мало залежить від зміни умов навколишнього середовища, таких як температура, тиск чи вологість. Враховуючи той факт, що волокна світловоду є прекрасними ізоляторами, вони можуть використовуватися поблизу електромагнітних полів великої інтенсивності.

1.1. Можливості поширення у світловоді. Передавання оптичного сигналу у світловоді значною мірою залежить від якості скла осердя і його стику з поверхнею оболонки [8]. Шлях проходження світла у волокні осердя залежить від розподілу коефіцієнта заломлення у площині поперечного перерізу волокна і кута падіння променя відносно осі світловоду. Розподіл коефіцієнта заломлення оболонки ϵ , здебільше, постійним. При постійному розподілі коефіцієнта заломлення в осерді на межі "осердя-оболонка" відбувається ступінчаста зміна оптичних властивостей волокна. Тому можна говорити про ступінчасту зміну показника заломлення світла, чи, скорочено, про ступінчастий світловід.

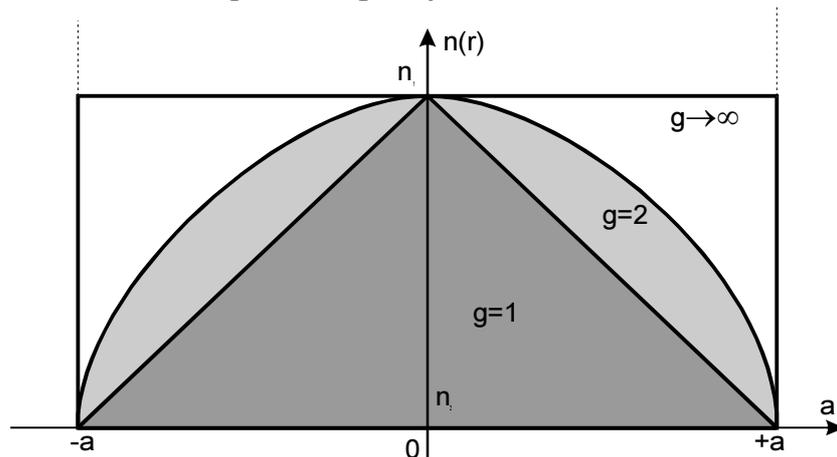


Рис.2. Профілі показника заломлення світла в осерді

Кращі передавальні властивості мають світловоди, для яких розподіл показника заломлення змінюється вздовж радіуса осердя. Світловод з таким профілем осердя називається **градієнтним**. Ступінчасті та градієнтні профілі розподілу показника заломлення осердя характерні для багатомодових світловодів. У деяких випадках структуру волокна можна відформувати так (малий діаметр осердя відносно довжини хвилі), що у світловоді

може поширюватися тільки промінь, вздовж осі волокна, т.зв. основна мода. Світловод з такою структурою називається **одномодовим**.

1.1.1. Світловоди зі ступінчастою зміною показника заломлення світла. Світловоди з таким розподілом показника заломлення світла складаються з діелектричного осердя з показником заломлення n_1 і оболонки з показником n_2 (рис.3). Якщо середовищем, з якого виходить світловий промінь, є повітря, то $n_0 = 1$.

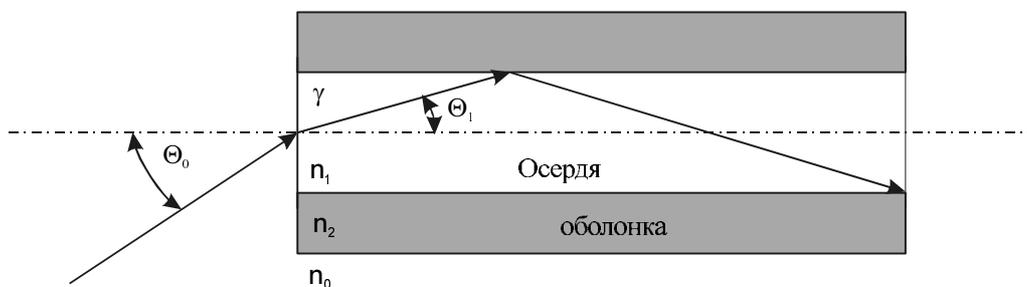


Рис.3. Ступінчастий світловод: напрям поширення світла

Використовуючи закон Снелліуса [1], можна знайти кут Θ_0 , під яким пучок світла може падати на торець світловоду, щоб отримати у його внутрішній частині кут Θ , який забезпечує поширення. Тоді

$$\frac{\sin \Theta_1}{\sin \Theta_0} = \frac{n_0}{n_1}, \quad (1)$$

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} - \gamma,$$

$$n_0 \sin \Theta_0 = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = n_1 \cos \gamma.$$

З умови повного внутрішнього відбивання:

$$\sin \gamma = \frac{n_2}{n_1},$$

$$n_0 \sin \Theta_0 = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \gamma},$$

$$n_0 \sin \Theta_0 = n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Якщо Θ_0 буде надмірно зростати, то γ може зменшуватись до величини, нижчої від критичного кута, і світлова хвиля не поширюватиметься. Θ_0 визначають з виразу:

$$\Theta_0 = \arcsin \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}. \quad (2)$$

Найбільше допустиме значення кута Θ_0 називається **кутом введення у світловод**.

Іншим параметром, що визначає здатність світловоду до введення падаючого випромінювання, є **числова апертура**. Вона безпосередньо пов'язана з кутом введення і описується виразом [1,2]:

$$NA = n_0 \sin \Theta_0. \quad (3)$$

Важливим параметром, який описує оптичні і трансмісійні властивості світловоду, є відносна зміна показника заломлення осердя і оболонки:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}. \quad (4)$$

Різниця показників заломлення є найменшою для волокон, виконаних повністю зі скла, більшою для волокон з полімерною оболонкою і найбільшою для повністю полімерних волокон. Разом із зростанням різниці показників заломлення осердя і оболонки ($n_1 - n_2$) зростає числова апертура з покращанням якості з'єднання на межі джерело-світловод. У таблиці порівнюються параметри трьох типів ступінчастих світловодів: типові значення показників заломлення з відповідними значеннями NA і кутів введення [9]. Значення числової апертури задається виразом:

$$NA = \sin \Theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (5)$$

Враховуючи, що світло надходить з повітря до осердя, показник $n_0 = 1$.

Типові значення числової апертури з відповідними кутами введення.

Конструкція світловоду	n_1	n_2	NA	Θ_0
Повністю скляний	1,48	1,46	0,24	13,9°
Оболонка полімерна	1,46	1,4	0,41	24,2°
Повністю полімерний	1,49	1,39	0,53	32°

1.1.2. Градієнтні світловоди. У градієнтних світловодах показник заломлення в осерді є змінним, найбільшим на осі осердя і зменшується вздовж радіуса [1].

Механізм проходження світла в осерді такого волокна відрізняється від згаданого для ступінчастих світловодів. Промінь світла не відбивається від межі осердя-оболонка, а викривлюється, проходячи область осердя хвилястими лініями. Зміна показника заломлення від осі волокна у напрямку осердя переважно описується залежностями [1,7]:

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right] \quad \text{для } r < a,$$

$$n^2(r) = n_2 = \text{const.} \quad \text{для } r \geq a,$$

де n_1 – показник заломлення світла на осі осердя ($r = 0$); n_2 – показник заломлення світла оболонки ($r \geq a$); r – віддаль від осі світловоду, мкм; a – радіус світловоду, мкм; g – параметр, який описує профіль осердя; Δ – відносна зміна показника заломлення.

Промені світла поширюються осердям світловоду траєкторіями, що своїм виглядом нагадують осциляційні функції, в той час як монотонна зміна показника заломлення викликає неперервну зміну напрямку поширення світла відносно осі волокна. Подібно як у світловоді з ступінчастим профілем, у градієнтному світловоді промені світла можуть поширюватися в осерді тільки у обмеженому діапазоні невеликих кутів.

1.1.3. Втрати у світловодах. У реальних діелектриках хвиля, що поширюється, втрачає свою енергію внаслідок абсорбції і розсіяння. У світловоді присутні ще додаткові втрати, що називаються хвилеводними і обумовлюються його конструкцією і структурою.

Втрати енергії у світловоді кількісно визначаються за допомогою величини, що називається затуханням і визначається як:

$$\alpha \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = \frac{10}{L} \lg \frac{P(0)}{P(L)}, \quad (6)$$

де L – довжина світловоду, км, $P(0)$ – потужність, підведена до світловоду, $P(L)$ – потужність, відведена від світловоду.

Затухання, яке дорівнює 10 дБ/км, означає, що світло після переходу через світловод завдовжки 1 км має 10 % початкової потужності. При затуханнях 3 дБ/км і 2 дБ/км ці потужності відповідно становлять 50 % і 79,4 %.

Втрати у світловодах визначаються властивостями матеріалів та технологією їх виготовлення і поділяються на дві групи [5,12]:

- Абсорбційні – викликані перетворенням світлової енергії;
- розсіювальні, зумовлені переходом енергії одних мод в інші.

Навіть чисте скло прозоре тільки у деякому діапазоні довжин хвиль. Прозорість обмежена в діапазоні хвиль у близькій УФ-області – молекулярною абсорбцією, яка виникає внаслідок взаємодії фотонів випромінювання з частинками скла (діапазон близько 4-5 мкм). Для коротких хвиль (0,3-0,4 мкм) спостерігається взаємодія фотонів з електронами іонів, які містяться у складі скла. Звідси випливає, що скло є прозорим для випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 4 мкм. Усі забруднення і дефекти скла, що виникають при введенні до чистого скла домішок, таких як наприклад, F, GeO₂, V₂O₅, P₂O₅, Al₂O₃ для зменшення чи збільшення величини показника заломлення відносно до показника заломлення SiO₂ більшою чи меншою мірою збільшують втрати потужності. Найбільше значення, однак, має присутність іонів ОН навіть у невеликих кількостях (порядку 0,001 ppm), що є причиною значної абсорбції світла при довжинах хвиль 1,37 мкм, 2,23 мкм, 0,95 мкм. Ці довжини хвиль визначають так звані трансмісійні вікна:

- короткохвильові (близько 0,85 мкм);
- довгохвильові (1,3 мкм і 1,55 мкм).

Присутність металів, особливо V, Cr, Fe, Mn, Cu, є додатковим джерелом втрат. При взаємодії фотонів з електронами відбувається поглинання світла. Для отримання затухання меншого, ніж 1 дБ/км, треба зменшити кількість іонів Fe чи Cu нижче від 0,001 ppm. У зв'яз-

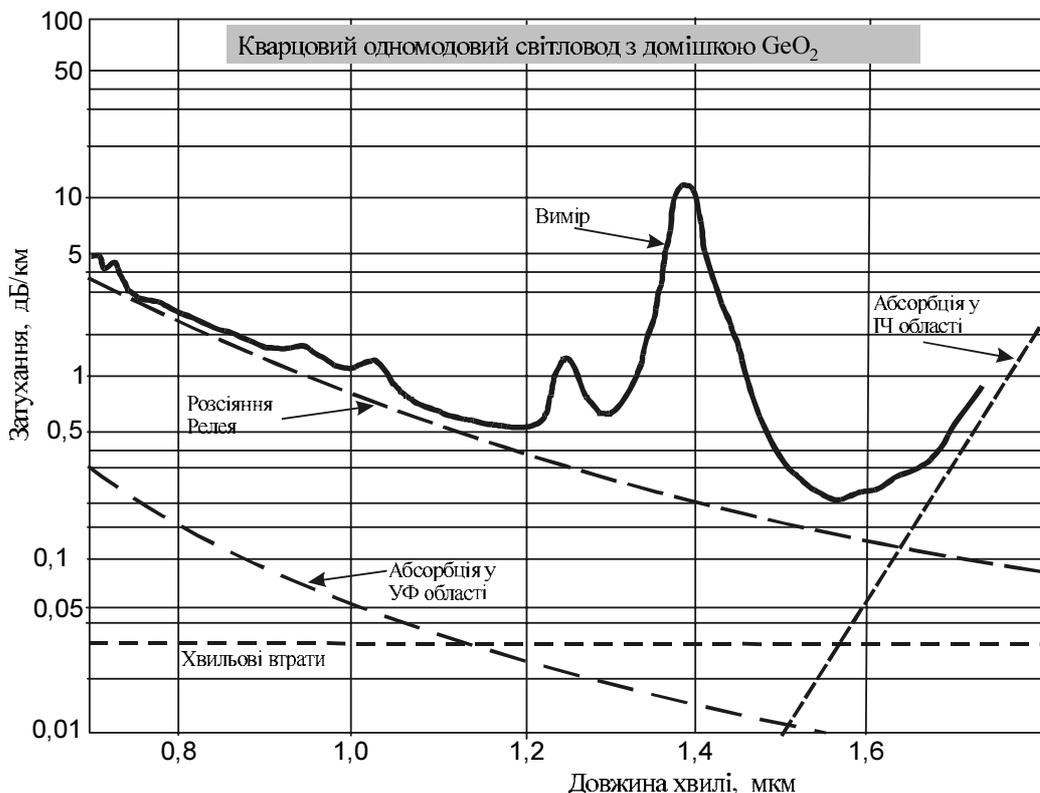


Рис.4. Характеристика затухання світловоду

ку з наявністю дефектів у склі відбуваються втрати на розсіяння, викликані тим, що енергія основної моди переходить до інших мод. Основним джерелом втрат на розсіяння є ефект Релея. Він виникає внаслідок випадкових неоднорідностей, які виявляють себе як флуктуації показника заломлення, викликані змінами густини і складу матеріалу. Затухання, викликане розсіянням, описують рівнянням [5]:

$$\alpha_R \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = \frac{k}{\lambda^4 [\mu\text{m}^4]}, \quad (7)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, залежний від виду скла.

Типові характеристики затухання наведені на рис.4.

2. З'єднання джерела світла із світловодом. З'єднання світловодів з джерелом світла – складна технічна проблема, яка є причиною великих втрат оптичної потужності. У загальному випадку якість з'єднання джерела випромінювання може бути оцінена через точність так:

$$\eta = \frac{P_o}{P_e}, \quad (8)$$

де P_e – потужність джерела світла; P_o – потужність, введена до осердя світловоду.

Головними причинами, які викликають втрати потужності випромінювання при з'єднанні світловоду з джерелом світла, є:

- різниця кутів випромінювання джерел і конуса введення світловоду (різниця числових апертур),
 - різниця емісійної поверхні й осердя світловоду,
 - відбивання Френеля на межі середовищ “напівпровідник-повітря” і “повітря-скло”.
- Випромінювання, що падає на поверхню світловоду в конусі з кутом при вершині, більшим від кута введення, не може повністю досягати осердя. Це викликає втрати, обумовлені значенням числової апертури (NA) світловоду. Точність з'єднання, що враховує це явище, описується залежністю [1,2,6]:

$$\eta = NA^2. \quad (9)$$

Вона є правильною для ступінчастих світловодів, з'єднаних із джерелами світла типу Ламберта [3,4]. Градієнтні світловоди мають змінну локальну величину NA від найбільшої – на осі до нуля на межі “осердя-оболонка”. Точність з'єднання такого світловоду із джерелом є змінною і зменшується з віддаленням від осі. Отже, повна потужність, подана від джерела Ламберта до градієнтного світловоду з геометричними розмірами і числовою апертурою (на осі світловоду), аналогічно до розмірів і апертур ступінчастого світловоду, буде меншою. Точність з'єднання джерела Ламберта з типовим градієнтним світловодом з коефіцієнтом профілю $a = 2$, є у два рази нижчою, ніж у випадку ступінчастого волокна і становить [2,3]:

$$\eta = \frac{NA^2}{2}, \quad (10)$$

Різниця величин поверхні джерела і осердя світловоду є другою за значенням причиною втрат при з'єднанні. Якщо емісійна поверхня більша від поверхні осердя світловоду, то для будь-якої оптичної схеми частина потужності випромінювання безповоротно втрачається. Зменшення величини потужності, введеної у волокно відносно повної потужності, яка випромінюється джерелом, можна обчислити за відношенням поверхонь осердя і джерела.

Ще однією причиною втрат при з'єднанні світловоду із джерелом світла є втрати на відбивання. Якщо між емісійною поверхнею і торцем світловоду існує проміжок, то частина потужності, що падає на межу “повітря-скло”, відбивається згідно із законом Френеля.

Величина коефіцієнта відбивання потужності може бути обчислена із залежності [1]:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (11)$$

де n_1 – показник заломлення середовища з боку падаючого променя; n_2 – показник заломлення середовища з боку заломленого променя.

Отже, 4 % світла відбиваються на межі “повітря-скло”, інші 96 % переходять до світловоду. Отже, втрати потужності становлять:

$$\Delta P = 10 \log(0,96) = 0,2 \text{ dB}.$$

Перехід світла з повітря до скла викликає втрати енергії близько 0,2 дБ. При переході світла зі скла до повітря вони ідентичні (див. рівняння (11)). Описані види втрат істотно відбиваються на точності з'єднання довільного джерела світла із світловодом. Враховуючи широке застосування світловодних діагностичних приладів, розглядали з'єднання термічних джерел об'ємного та поверхневого випромінювання.

2.1. З'єднання термічних джерел з поверхневим випромінюванням. Розглянемо непрозоре тіло, що сильно абсорбує випромінювання. При його нагріванні утворюється випромінювання з більшої частини його поверхні. Інтенсивність випромінювання пов'язана з поверхневою температурою. Згідно із законом Ламберта [9,10] спектральна потужність, що передається з одиничної площі dA_t (на поверхні джерела) до одиничної площі dA_s (на верхній поверхні світловоду), виражається як:

$$P_\lambda (dA_t \rightarrow dA_s) = I_\lambda \cos \Theta_t dA_t d\Omega_s. \quad (12)$$

$$I_\lambda = \varepsilon_{\lambda T} \frac{E_{\lambda T}}{\pi}.$$

$$E_{\lambda T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad \text{– формула Планка,}$$

де $\varepsilon_{\lambda T}$ – коефіцієнт емісії (порівняння емісії даного тіла з емісією абсолютно чорного тіла); $E_{\lambda T}$ – кількість емітованої енергії у просторовому куті 2π [sr] для температури T на одиницю поверхні за одиницю часу; λ – довжина емітованої хвиль; T – температура; c_1, c_2 – постійні ($c_1 = 5,95 \cdot 10^{-17}$; $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ МК).

Нехай світловод розміщений на віддалі h від протяжного (дифузійного) термічного поверхневого джерела з температурою T і емісією $\varepsilon_{\lambda T}$. Приклад такого з'єднання подано на рис.5. Позначаючи ψ – кут нахилу поверхні джерела відносно поверхні торця світловоду R_s і F_s та R_t і F_t – поточні координати відповідно одиничних площ dA_s і dA_t , F'_t – азимутальний кут проекції на площину, паралельну до поверхні торця світловоду, β – кут між R_t і його проекцією на площину, паралельну до торцевої поверхні світловоду, h_0 – віддаль між торцем і випромінюючою поверхнею (виміряна вздовж нормалі до dA_s), R – віддаль між dA_s і dA_t , Θ_1 – кут між нормаллю до dA_t і променем R , Θ_t – кут між нормаллю до dA_s і R , одиничний просторовий кут з (12) можна записати:

$$d\Omega_s = \frac{dA_s \cos \Theta_1}{R^2}.$$

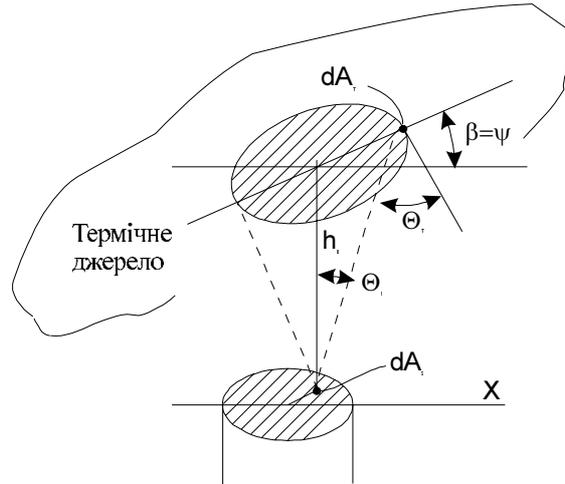


Рис.5. Безпосереднє з'єднання поверхневого термічного джерела із світловодом

Підставляючи у (12) геометричні залежності з рис.5 й інтегруючи у повних змінних повну потужність, доведену до світловоду, можна подати як [9]:

$$P_{\lambda}(A_T \rightarrow A_S) = 4\Theta I_{\lambda} \int_0^{\pi/2} \sin \Theta_1 \cos \Theta_1 d\Theta_1 \int_0^{\pi/2} d\lambda \int_{a \sin \mu}^a \frac{a \cos \mu \cdot R_S}{\sqrt{R_S^2 - a^2 \sin^2 \mu}} dR_S. \quad (14)$$

З повної потужності випромінювання, доведеної до торця світловоду з термічного джерела, поширюється в осерді тільки та її частина, що міститься у променях, які падають під кутом, що не перевищує граничний кут відбивання,

$$\Theta_c = \arccos \frac{n_p}{n_r}, \quad (15)$$

де n_p – показник заломлення світла в оболонці; n_r – показник заломлення світла в осерді.

Для усунення променів, що не виконують умову (15), вводиться функція G , визначена так:

$$G = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \cos \gamma \cdot \sin \Theta \leq \sin \Theta_c, \\ 0, & \text{якщо } \cos \gamma \cdot \sin \Theta \geq \sin \Theta_c, \end{cases} \quad (16)$$

де γ – кут між проекцією оптичного шляху на поверхню осердя і його променем.

Враховуючи вищесказане, залежність світлової потужності, доведеної до осердя з термічного джерела, набуде вигляду

$$P_w(\lambda) = P_a(\lambda, T) \int_{\Theta_1=0}^{\pi/2} F_w(\Theta_1, \Theta_{1c}) d\Theta_1, \quad (17)$$

де

$$P_a(\lambda, T) = \pi^2 a^2 I_1(T),$$

$$F_w(\Theta_1, \Theta_{1c}) = \frac{8}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \Theta_1 \sin \Theta_1 \cos^2 \mu G \left(\frac{\sin \Theta_{1c}}{\sin \Theta_1} - \cos \mu \right) d\mu.$$

Зовнішній граничний кут Θ_{1c} світловоду зв'язаний з внутрішнім граничним кутом Θ_1 законом Снелліуса:

$$\sin \Theta_{1c} = \frac{n_r}{n_1} \sin \Theta_c.$$

Рівняння (17) можна подати у вигляді:

$$P_w(\lambda, T) = 8\pi a^2 I_\lambda \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \cos \Theta_1 \sin \Theta_1 \cos^2 \mu G \left(\frac{\sin \Theta_{1c}}{\sin \Theta_1} - \cos \mu \right) d\mu d\Theta_1. \quad (18)$$

Щоб обчислити потужність, доведену до світловоду у всьому діапазоні довжин хвиль, емітованих термічним джерелом, треба просумувати вираз (18). У розглянутому діапазоні довжин хвиль [9,11]:

$$P_w(\lambda, T) = 8\pi a^2 I_\lambda \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \cos \Theta_1 \sin \Theta_1 \cos^2 \mu G \left(\frac{\sin \Theta_{1c}}{\sin \Theta_1} - \cos \mu \right) d\mu d\Theta_1. \quad (19)$$

2.2. З'єднання об'ємних термічних джерел. Розглянемо однорідне напівпрозоре тіло з постійною температурою T , розташоване у цілому підпросторі. Світловод поміщається на відстані h від поверхні тіла, оптична вісь світловоду є нормальною до випромінюючої поверхні (рис.6).

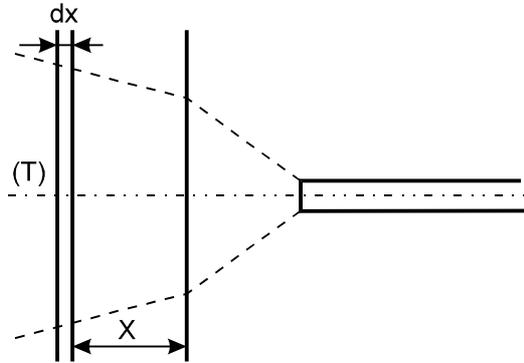


Рис.6. Схема з'єднання об'ємного джерела із світловодом

Кутове розподілення потужності, доведеної до світловоду з випромінюючого шару Δx , що знаходиться на відстані x від поверхні (відстань $x+h$ верхівки світловоду), було визначене введенням у рівняння (12) фактора емісії шару [9]:

$$P_w(\Theta_1, \gamma, \lambda, \Delta x, x) = P_w(\Theta_1, \gamma, \lambda) \varepsilon_\lambda(\Theta_1, \Delta x, x). \quad (20)$$

де $P_w(\Theta_1, \gamma, \lambda)$ – потужність, визначена рівнянням (18) (якщо знехтувати границями інтегрування). ε_λ є кутовою емісією (тільки залежною від Θ_1) випромінюючого шару завтовшки Δx , визначеного за правилом Кірхгофа:

$$\varepsilon_\lambda(\Theta_1, \Delta x, x) = \left[1 - \exp \left[-\frac{\alpha(\lambda) \Delta x}{\cos \Theta_b} \right] \right] \exp \left[-\frac{\alpha(\lambda) x}{\cos \Theta_b} \right]. \quad (21)$$

Кут Θ_{1c} всередині об'ємного джерела пов'язаний з кутом Θ_1 (у робочому тілі, що заповнює простір між джерелом і світловодом) законом Снелліуса:

$$\Theta_b = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_b} \sin \Theta_1 \right),$$

де n_b – показник заломлення об'ємного джерела, а $a(x)$ – коефіцієнт абсорбції.

Повну потужність, доведену до світловоду з визначеного випромінюючого шару, можна обчислити із залежності [9]:

$$P_w(\lambda, \Delta x, x) = \int_0^{\Theta_{1c}(\Delta x, x)} d\Theta_1 \int_0^{\pi/2} P_w(\Theta_1, \gamma, \lambda) \varepsilon_\lambda(\Theta_1, \Delta x, x) d\gamma. \quad (22)$$

Графік залежності (22) і максимального кута введення світловоду від оптичної глибини αx випромінюючого шару показано на рис.7.

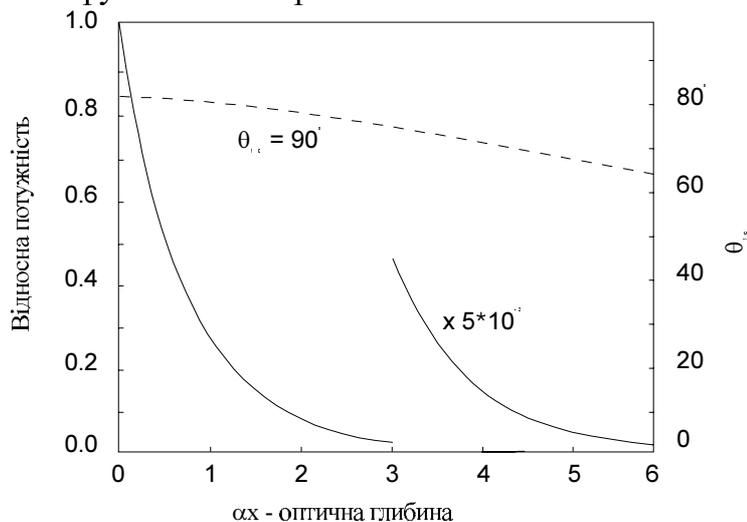


Рис.7. Відносна потужність $P_w(\lambda, \Delta x, x) / P_w(\lambda, \Delta x, 0)$, доведена до світловоду з послідовних шарів об'ємного джерела, у залежності від оптичної глибини шарів (неперервні криві)

Пунктирна крива показує зміну максимального кута, пов'язаного з послідовними шарами джерела для світловоду з $\Theta_{1c} = 90^\circ$.

Як видно з рис.7, у міру збільшення оптичної глибини настає зменшення потужності, яку цей шар доводить до світловоду, порівняно з потужністю, доведеною зовнішнім шаром джерела. Одночасно відбувається зменшення кута введення світловоду, зв'язаного з цим випромінюючим шаром. Остання залежність є малою, що пов'язано з малим значенням відносної потужності, яка доводиться з глибоко розміщених випромінюючих шарів. Тепловою потужність, доведену до світловоду з цілого об'єму термічного джерела в повному діапазоні довжин хвиль, емітованих цим джерелом, можна обчислити, підсумовуючи вираз (23) у повному діапазоні змін λ і x .

$$P_{wc} = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda=\lambda_2} \sum_{x=0}^{x=x_{\max}} P_w(\lambda, \Delta x, x). \quad (23)$$

Повна потужність, доведена до світловоду з об'ємного термічного джерела, сильно залежить від параметрів світловоду Θ_{1c} і параметрів джерела: температури T , коефіцієнта абсорбції $a(\lambda)$, коефіцієнта емісії $E_{\lambda T}$ й оптичної глибини джерела.

3. Світловодний прилад для контролю пилового пальника у промислових умовах. Надійна система моніторингу полум'я у промислових умовах має принципове значення для безпечної і ощаднішої роботи котла. Стан полум'я повинен бути добре видимим для оператора, щоб завчасно побачити нестабільність згоряння чи його погашення. Виявлення нестабільності полум'я дає завчасну інформацію про погану роботу допоміжного обладнання, регуляторів, небажаної кількості повітря, поганої якості палива тощо для запобігання серйознішим неприємностям. Для виключення цих загроз, а також кращого проведення процесу, кожний пальник повинен бути обладнаний приладом моніторингу процесу спалювання.

Для правильного виконання світловодного сенсора, що неперервно працює у складних умовах, необхідно здійснити:

- аналіз областей полум'я для вибору найбільш чутливої до змін зовнішніх параметрів (кількість первинного і вторинного повітря),
- просторове сканування полум'я,
- аналіз впливу якості вугілля, кількості первинного і вторинного повітря на зміни у пульсаціях полум'я.

Для досліджень був розроблений вимірювальний пристрій, блок-схема якого подана на рис.8.

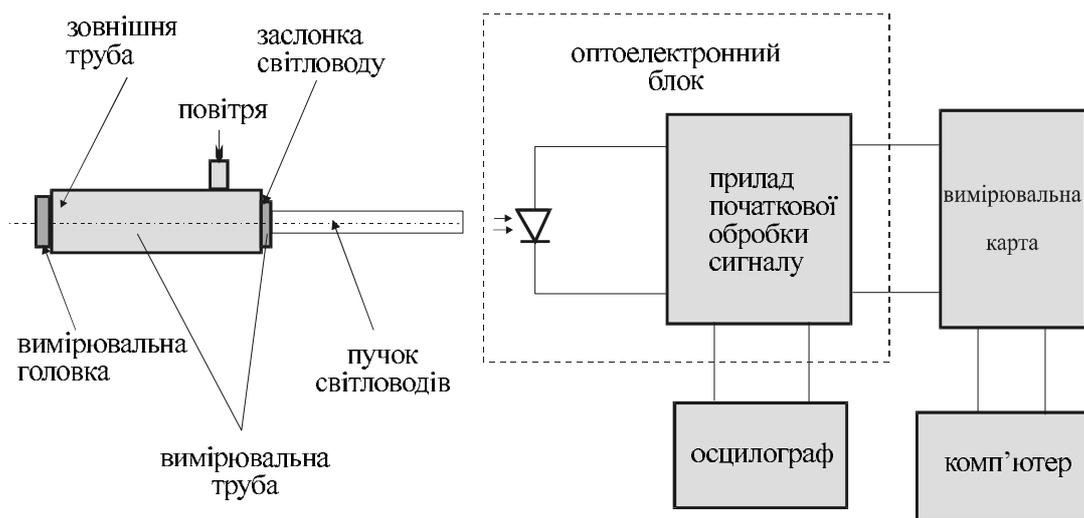
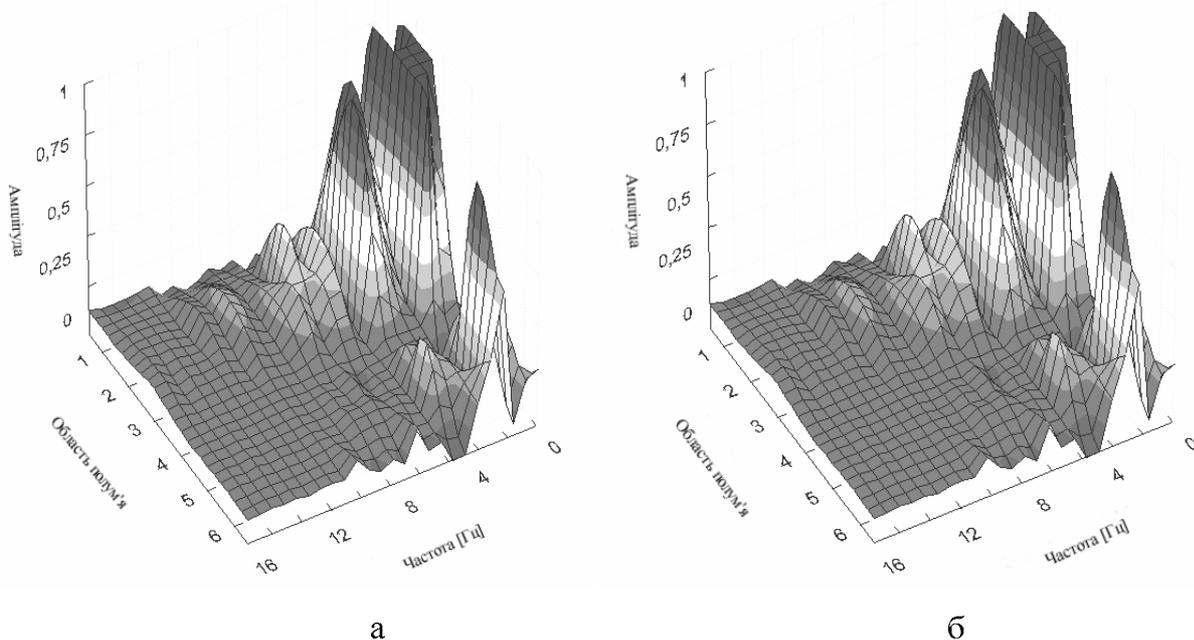
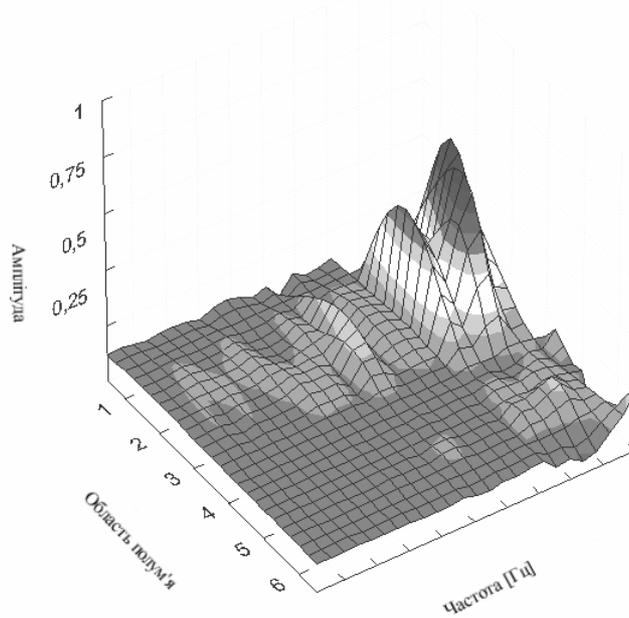


Рис.8. Блок-схема світловодного приладу моніторингу полум'я

Він робить можливим одночасний вимір шести областей полум'я. Застосовані оптоелектронні елементи дозволяють здійснити контроль вугільного і мазутного полум'я.

4. Результати вимірювань. Вимірювання були проведені у котлі ОР-650 на електростанції Козеніце неперервним способом при стрибкоподібній зміні умов роботи вибраного пального. Виміри виконані як для паливників з високою емісією, так і для паливників з низькою емісією. Результати показано на рис.9-10.



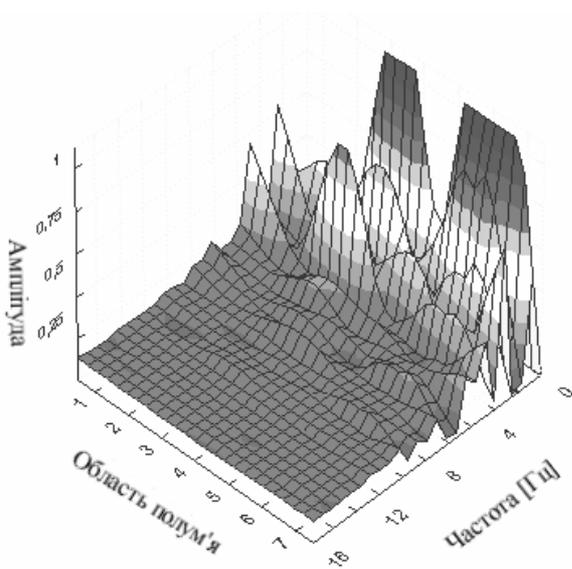


В

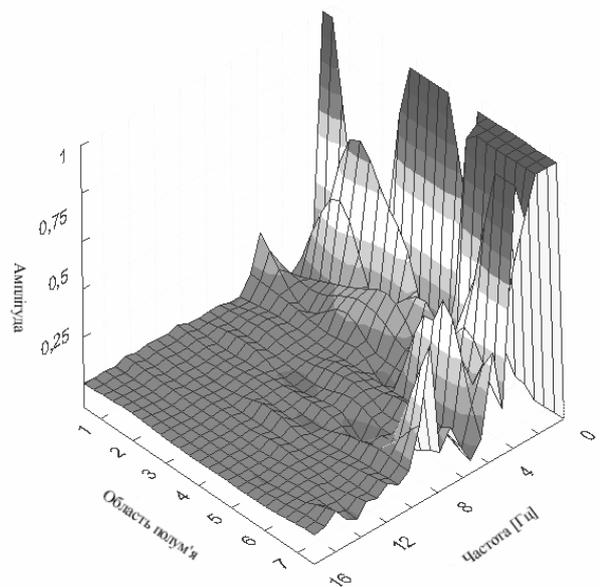
Рис.9. Результати вимірів для пальників з низькою емісією

Висновки. На підставі проведених вимірів можна сформулювати такі висновки:

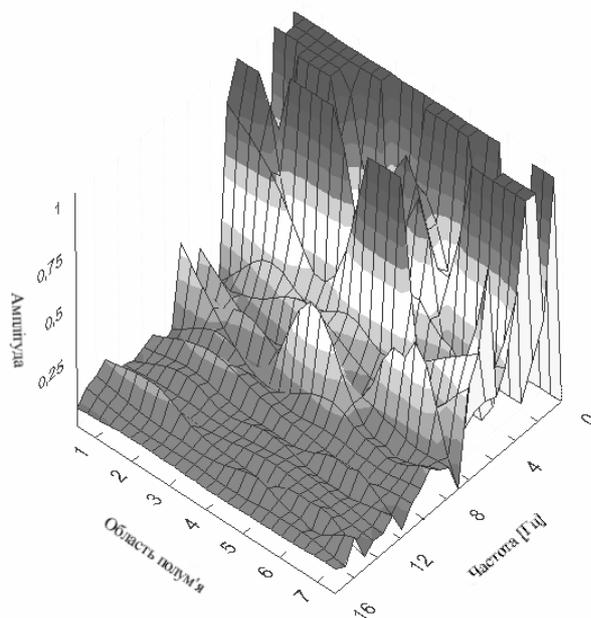
- мерехтіння полум'я може бути використане для контролю роботи типових промислових пальників;
- у цьому полум'ї можна виділити області з найбільшою чутливістю до змін вхідних параметрів;
- для спрощення конструкції апаратури, призначеної для контролю роботи пальника, слід виконати підготовчі дослідження зміни просторового розподілення пульсації полум'я;



а



б



В

Рис.10. Результати вимірів для пальників з високою емісією

• результати вимірювань полум'я є найшвидше отримуваною інформацією, для отримання від аналізованого об'єкта і можуть використовуватися як для контролю, так і для керування його роботою.

1. Joseph C.Palais: *Zarys telekomunikacji swiatowodowej*, WKJ Warszawa, 1991. 2. B.Crosignani, G.de Marchis, A.Tadeusiak: *Swiatowody w telekomunikacji*, WKJ, – Warszawa, 1987. 3. A.Smolicki: *Optoelektronika swiatowodowa*, WKJ, – Warszawa, 1985. 4. J.E.Midwinter: *Swiatowody telekomunikacyjne*, WNT, – Warszawa, 1983. 5. Majewski: *Teoria i projektowanie ņwiatowodowyw*, WNT, – Warszawa, 1991. 6. Smolicki: *Swiatowody i ich zastosowanie*, Ossolineum, – Wroclaw, 1980. 7. K.Holejko: *Podstawy telekomunikacji ņwiatowodowej*, Wyd. Francusko-Polskiej Wyższej Szkoły Nowych Technik Informatyczno-Komunikacyjnych EFP, – Poznań, 1995. 8. M.Szustakowski: *Elementy techniki ņwiatowodowej*, WNT, – Warszawa, 1992. 9. A.Zur, A.Katzir: *Theory of noncontact point thermal sensing by fiber-optics radiometry*, *Appl. Opt.* – Vol.31. – No 1. – January 1992. 10. Sz.Szczeniowski: *Fizyka doņwiadczalna cz.IV "Optyka"*, PWN, – Warszawa, 1983. 11. A.Kotyra et al: *Investigation of the electric supply system based on fibre optic feeder*, *Proceedings of The International Conference on Intermolecular Interactions in Crystallization Process and Characterization of Physical Effects in Solids*, Kazimierz Dolny, 27-28 September 1993. – Str.114-118. 12. J.E.Midwinter, Y.L.Guo: *Optoelektronika i technika ņwiatowodowa*, WKJ, – Warszawa, 1995. 13. W.Wyjcik: *The utilisation of flame flicker in the fibre-optic system for combustion quality evaluation in industrial energetic boilers*. *Conference EUROSENSORS XI, Warsaw.* – Vol.3. – Str.997-1000. 14. W.Wojcik: *Optical fibre system for flame monitoring in energetic boilers*, *Proceedings of SPIE, Technology and Applications of Light Guides*, – 1997. – Vol.3189. – Str.74–82. 15. W.Wyjcik, A.Kotyra, A.Smolarz: *The Optical Fibre System for Flame Visualisation in Industrial Energetic Boilers*, *III Konferencja Naukowo-Techniczna MECHATRONIKA '97.* – Warszawa, 2 listopad 1997. – T.2. – Str.899-902. 16. W.Wyjcik: *Swiatowodowy układ do diagnostyki procesyw spalania*, *II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Diagnostyka Procesyw Przemyslowych Jagyw k/Zielonej Gyry.* – Str.401-406.