

**В.М. Ночвай**

**КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ  
ДВОФАЗНИХ ПОТОКІВ**

**Збірник наукових праць**

**ЖИТОМИР**

**2020**

**УДК 621.317.39.(08)**

**H86**

Рекомендовано до друку Вченою радою Державного університету «Житомирська політехніка» МОН України (протокол №3 від 22 травня 2020 р.)

**Рецензенти:**

**В. Г. Петрук**, доктор технічних наук, професор (Вінницький національний технічний університет)

**В. Ю. Кучерук**, доктор технічних наук, професор (Вінницький національний технічний університет)

**Ю. О. Подчашинський**, доктор технічних наук, професор (Державний університет «Житомирська політехніка»)

**Ночвай, В. М.**

**H86** Контроль параметрів двофазних потоків : збірник наукових праць / В. М. Ночвай – Житомир : «Житомирська політехніка», 2020. – 162 с.  
**ISBN 978-966-683-554-6**

В збірнику представлені наукові праці, які присвячені підвищенню швидкодії засобу контролю та вірогідності контролю витрат кисню з застосуванням нескладної інструментальної бази. У наукових працях розроблено та досліджено засіб та метод контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу у пальній суміші пального, за спадом до нуля потоку випромінювання частинок сажового вуглецю.

Для фахівців в області приладобудування та науково-технічних працівників, які займаються питаннями контролю параметрів газополуменевої обробки металів, а також для студентів ВНЗ.

**УДК 621.317.39.(08)**

**ISBN 978-966-683-554-6**

© В. Ночвай, 2020

## ПЕРЕДМОВА

В збірнику представлені наукові праці, які присвячені розробленню методу контролю витрат кисню пального, підвищенню швидкодії засобу контролю та вірогідності контролю витрат кисню із застосуванням нескладної інструментальної бази.

Матеріал збірника представлено у двох частинах.

В першій частині збірника представлені розроблені автором ряд методик для проведення досліджень, а саме: «Методика перерахунку градувальної характеристики ротаметра», «Методика вимірювання потоку випромінювання твердих частинок», «Дослідження швидкодії контролю витрат кисню пального» та інші.

В другу частину збірника увійшли: статті, опубліковані в наукових виданнях України; тези доповідей науково-технічних та науково-практичних конференцій; науково-технічних семінарів; перелік патентів України на винаходи.

Наукові праці, які увійшли у другу частину збірника, опубліковані автором в наукових виданнях в період з 1990 року по 2019 рік. Наукові праці розміщені в хронологічному порядку та приведені на мові оригіналу. Розміщення наукових праць в хронологічному порядку дає можливість читачу отримати інформацію про послідовність розв'язання поставлених наукових задач на шляху вирішення наукової проблеми в цілому.

Назву наукового видання, в якому опублікована наукова праця, приведено перед її початком. Нумерація рисунків, таблиць, формул та посилань на літературні джерела кожної наукової праці ідентична з нумерацією рисунків, таблиць, формул та посилань у науковому виданні, в якому вона опублікована. Список використаної літератури, яка дає можливість більш детально ознайомитися з тим чи іншим конкретним питанням, приведено в кінці кожної статті.

Книга може бути корисна для фахівців по спеціальності 05.11.13 «Прилади та методи контролю та визначення складу речовин». Згідно Переліку 2015 представлені наукові праці відносяться до галузі знань 15, спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка».

Висловлюю надію, що книга принесе користь для фахівців в області приладобудування та науково-технічних працівників, які займаються питаннями контролю параметрів газополуменевої обробки металів, а також для студентів вищих навчальних закладів.

*Автор*

## ВСТУП

Підвищення надійності та довговічності сучасних машин та обладнання є важливою задачею машинобудування. Одним із шляхів розв'язання цієї задачі є застосування газотермічних покриттів. Серед існуючих методів нанесення захисних покриттів важливе місце займають газотермічні методи напилювання покриттів. Напилюванням покриттів можна в 2...5 разів зменшити спрацювання деталей, а також ефективно відновлювати спрацьовані деталі.

Для якісного проведення процесу зварювання необхідно підтримувати певне співвідношення окислювача та горючого газу, причому для різних матеріалів це співвідношення повинно знаходитися в різних межах. Зварювання більшості сплавів ведеться нормальним полум'ям, в якому співвідношення окислювача та горючого газу близьке до стехіометричного. В ряді випадків вимагається або відновлювальне полум'я, яке характеризується надлишком горючого газу і недостаткою окислювача, або окислювальне полум'я, яке характеризується надлишком окислювача і недостаткою горючого газу.

При напилюванні покриттів, а також при зварюванні легованих сталей, міді, бронзи, нікелю, алюмінію і при газовому паянні металів процес ведуть нормальним (нейтральним) полум'ям. Якість наплавленого металу, міцність зварного шва та паяного з'єднання в значній мірі залежить від складу полум'я, тому під час зварювання зварник повинен слідкувати за його типом, регулювати його склад протягом всього процесу зварювання.

Фізико-механічні властивості газотермічних покриттів у значній мірі залежать від технологічних режимів їх напилювання, у тому числі від стехіометричного співвідношення кисень-горючий газ у пальній суміші, яке визначає тип полум'я пальника. При напилюванні покриттів процес ведуть нормальним полум'ям. Тому під час напилювання покриття зварник повинен слідкувати за типом полум'я, контролювати його склад на протязі всього процесу нанесення покриття.

Нормальне полум'я теоретично отримують тоді, коли співвідношення кисню та горючого газу у пальній суміші пальника є стехіометричним, яке розраховують за формулою хімічної реакції процесу горіння палива. Але формула не враховує забрудненість робочих газів.

Регулювання полум'я пальників у нинішній період ведеться візуально по виду полум'я, але такий спосіб може призвести до значних похибок, особливо при відсутності у зварника досвіду. Отже,

встановлення співвідношення кисень-горючий газ у пальній суміші пального візуально по виду полум'я приводить до значних похибок, а відтак і низький ступінь вірогідності контролю.

Методи контролю стехіометричного співвідношення кисень-горючий газ у пальній суміші пального шляхом визначення хімічного складу продуктів згорання пальної суміші газоаналізаторами і хроматографами дають високу точність та вірогідність контролю, але вимагають багато часу для проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю.

Наявна проблема полягає в необхідності підвищення швидкодії засобу контролю та вірогідності контролю витрат кисню з застосуванням нескладної інструментальної бази, яка не вимагає високого рівня кваліфікації оператора. Тому розроблення методу контролю витрат кисню пального, підвищення швидкодії засобу контролю та вірогідності контролю з одночасним зменшенням складності інструментальної бази є актуальною задачею.

У наукових працях, які увійшли в книгу, приведено наступні результати досліджень:

- характерні властивості полум'я газового пального;
- результати досліджень випромінювання полум'я пального;
- аналіз методів та засобів контролю спалювання газоподібних палив;
- теоретичне обґрунтування діапазону вимірювання потоку випромінювання твердих частинок полум'я;
- результати досліджень залежності потоку випромінювання частинок сажового вуглецю від витрат кисню;
- встановлено зв'язок між напругою на виході оптико-електронного приладу (ОЕП) і потоком випромінювання частинок сажового вуглецю;
- удосконалено ОЕП вимірювання потоку випромінювання твердих частинок;
- теоретично обґрунтовано та розроблено метод контролю витрат кисню газових палив із застосуванням удосконаленого ОЕП;
- досліджено засіб та метод контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу у пальній суміші пального, за спадом до нуля потоку випромінювання частинок сажового вуглецю;
- досліджено точність вимірювань, швидкодію удосконаленого ОЕП та вірогідність контролю витрат кисню газових палив.

## Частина перша. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1. МЕТОДИКА ПЕРЕРАХУНКУ ГРАДУЮВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОТАМЕТРА

В процесі вимірювального контролю параметрів технологічних процесів виникає необхідність вимірювати витрати робочих газів. Найбільш широко для вимірювання та регулювання витрат робочих газів при виконанні автогенної обробки матеріалів застосовують ротаметри, які є витратомірами постійного перепаду тиску.

Ротаметри зі скляною ротаметричною трубкою і місцевими показами призначені для вимірювання об'ємних витрат плавно змінних однорідних потоків рідин і газів. Витрати газу визначаються величиною поперечного перерізу, між стінками уніфікованої конічної трубки та поплавком, який піднімається потоком газу до вершу до тих пір, поки не утвориться потік, який урівноважить вагу поплавка. Кожному положенню поплавка по висоті трубки відповідають конкретні витрати, які відраховуються на верхній гострій крайці конусних поплавків. Регулювання витрат газів реалізується регуляторами ротаметрів.

Технічні дані ротаметра типу ДЕМ 3486011 (табл. 1.1) відповідають вимогам, які висуваються до вимірювальних приладів установок газополуменевого напилювання газотермічних покриттів, таких як, «Термо-1», «Термо-1м», «Термо-2», «Термо-3», Л5405А та інші і має просту конструкцію (рис. 1.1).

Таблиця 1.1

**Технічні дані та робочі умови ротаметра ДЕМ 3486011**

№ з/п	Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення параметра
1.	Робочий тиск	атм.	не більше 1,0
2.	Довжина шкали ротаметра	мм	150
3.	Кількість поділок шкали	–	100
4.	Максимальні витрати аргону	л/год	до 1400
5.	Робочі умови: – температура навколишнього середовища – відносна вологість – атмосферний тиск	°С % мм. рт. ст.	+10 ... +25 65 ± 15 750 ± 30

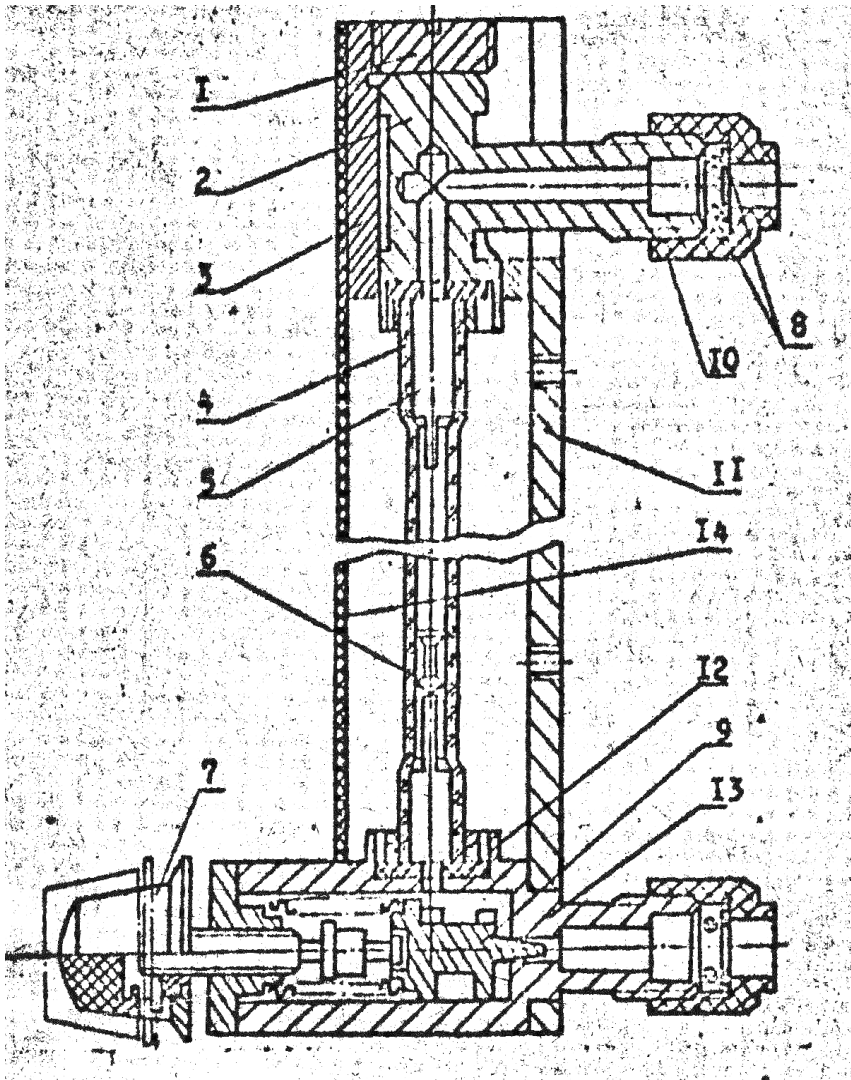


Рис. 1.1. Будова ротаметра типу ДЕМ 3486:

- 1 – гайка; 2 – корпус; 3 – корпус; 4 – трубка; 5 – упор; 6 – поплавков;  
 7 – ручка; 8 – прокладки; 9 – вентиль; 10 – накидна гайка; 11 – основа;  
 12 – прокладка; 13 – корпус; 14 – прозора кришка

Градуювання ротаметрів індивідуальне, виконується заводом-виробником аргоном при тиску на вході в ротаметр 0,2 атм. Витрати аргону через ротаметр моделі ДЕМ 3486011 (заводський номер № 493) відповідають даним, приведеним в таблиці 1.2. З метою визначення витрат до паспорта ротаметра прикладається графік значень витрат аргону, побудований по результатам градуювання (рис. 1.2).

Таблиця 1.2

**Витрати аргону**

Поділка шкали	Час в хв	Витрати газу, л/хв	Поділка шкали	Час в хв	Витрати газу, л/хв
0	1	6,8	60	1	26,8
10	1	10	70	1	29,2
20	1	13,2	80	1	32,6
30	1	16,4	90		
40	1	19,6	100		
50	1	23,3			

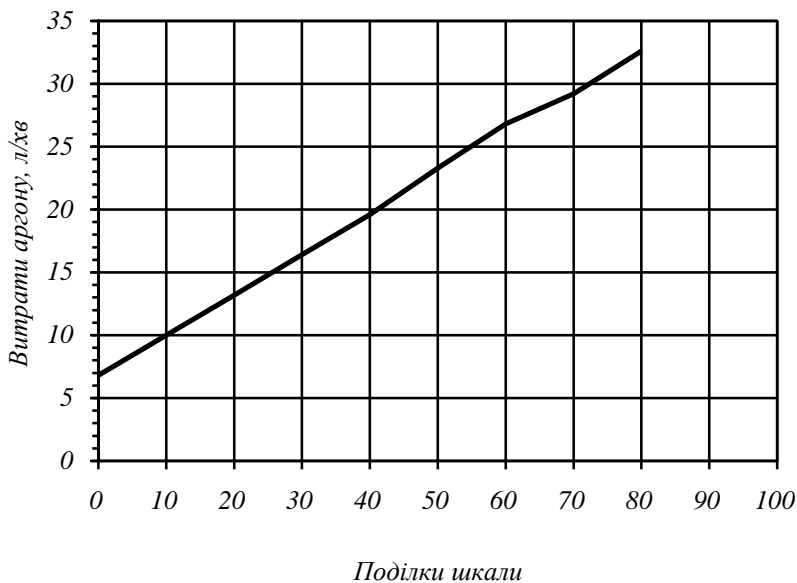


Рис. 1.2. Градувальний графік значень витрат аргону ротаметра моделі ДЕМ 3486011 (заводський номер № 493)



При використанні ротаметра з градуовальною характеристикою по аргону на газах, які відмінні по густині, а також при зміні тиску та температури газу, що вимірюють, від вказаних в паспорті, з метою більш близького наближення до дійсної величини витрат газу, доцільно виконати перерахунок градуовальної характеристики ротаметра по одній з наступних формул:

$$V_2 = V_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot P_1 \cdot T_2}{\rho_2 \cdot P_2 \cdot T_1}}; \quad (1.1)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}, \quad (1.2)$$

де  $V_2$  – витрати газу, що вимірюють, в робочих умовах;  
 $V_1$  – витрати аргону по градуовальному графіку;  
 $\rho_1$  – густина аргону в нормальних умовах;  
 $\rho_2$  – густина газу, що вимірюють, в нормальних умовах;  
 $P_1$  – абсолютний тиск аргону при градуюванні;  
 $P_2$  – абсолютний тиск газу, що вимірюють, в робочих умовах;  
 $T_1$  – температура аргону при градуюванні по шкалі Кельвіна;  
 $T_2$  – температура газу, що вимірюють, в робочих умовах по шкалі Кельвіна.

В установці Л5405А, «Термо-3» в якості робочих газів використовують кисень, ацетилен або пропан-бутан, охолоджувальне та транспортувальне повітря. Для вимірювання та регулювання витрат газів застосовано чотири ротаметри мод. ДЕМ 3486011.

Перерахунок градуовальних характеристик з аргону на робочі гази, що вимірюють, проводиться на місці експлуатації. В таблиці 1.3 приведено результати перерахунку градуовальних характеристик з аргону на кисень (заводський номер ротаметра № 493). По отриманим даним будують графік витрат для газів, що вимірюють (рис. 1.3).

Таким же чином виконують градуювання ротаметрів для вимірювання витрат інших газів (пропан, ацетилен, водень), а також газових сумішей (стиснуте повітря, пропан-бутан та інші).

Якщо робочі умови (густина газу, атмосферний тиск, температура газу, температура навколишнього середовища) змінилися, то градуювання ротаметрів необхідно виконати по одній із формул (1.1) або (1.2) з врахуванням цих змін.

Таблиця 1.3

**Результати перерахунку градувальних характеристик з аргону на кисень (заводський номер ротаметра № 493)**

Поділлка шкали	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Витрати аргону, л/хв	6,8	10	13,2	16,4	19,6	23,3	26,8	29,2	32,6		
Витрати кисню, л/хв	7,6	11,2	14,7	18,4	22,0	26,1	30,0	32,7	36,5		

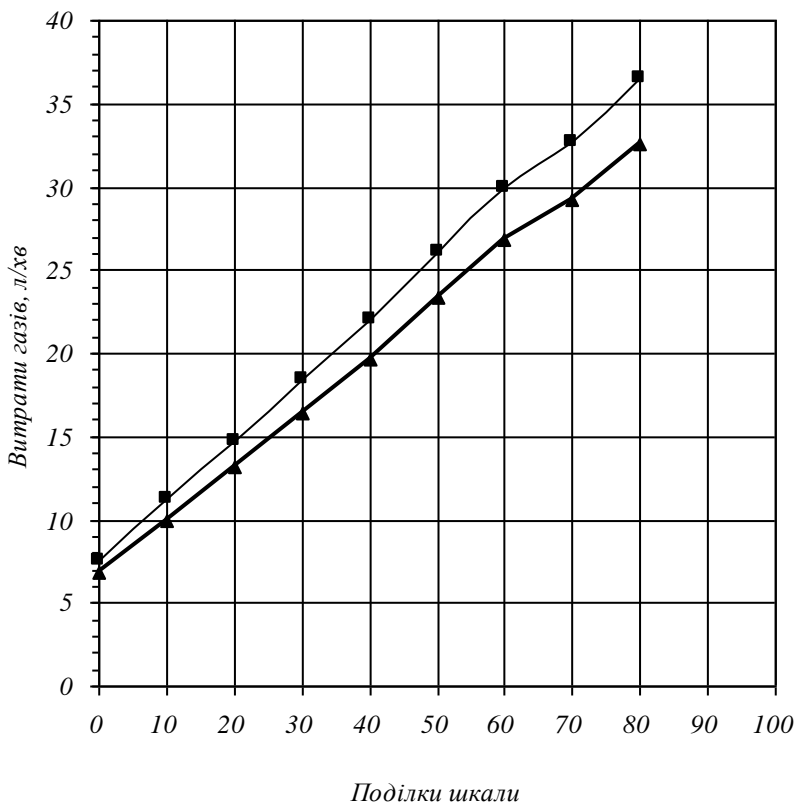


Рис. 1.3. Градувальний графік значень витрат аргону та кисню ротаметра моделі ДЕМ 3486011 (заводський номер № 493):

■ – кисень; ▲ – аргон

## 2. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ПРИЛАД «ВУГЛЕЦЬ»

### 2.1. Призначення приладу

Розроблений оптико-електронний прилад призначений для вимірювання потоку випромінювання твердих частинок, які знаходяться у високотемпературному двофазному потоці газ-тверді частинки, з метою встановлення типу полум'я газових пальників. Суть розробки полягає в тому, що прилад вимірює потік випромінювання твердих частинок сажового вуглецю в вузькому спектральному діапазоні, де випромінювання газів відсутнє.

Прилад розрахований для експлуатації у виробничих та лабораторних умовах.

ОЕП «Вуглець» складається з електронного блоку, давача і блоку живлення (рис. 2.1).



Рис. 2.1. ОЕП «Вуглець»

### 2.2. Основні технічні характеристики ОЕП «Вуглець»

Робочий діапазон спектру – 0,5...1,1 мкм.

Тип приймача випромінювання – ФД-25К.

Напруга джерела живлення –  $\pm 9$  В.

Діаметр корпусу перетворювача потік випромінювання-електричний сигнал – 35 мм.

Довжина корпусу перетворювача потік випромінювання-електричний сигнал – 120 мм.

Габарити електронного блоку – 88×58×31 мм.

Маса приладу (без джерела живлення) – 0,27 кг.

### 2.3. Основні переваги розробленого приладу

Визначення хімічного складу продуктів згорання пальної суміші газоаналізаторами і хроматографами дають високу точність та вірогідність контролю, але вимагають багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю.

До переваг розробленого приладу відносяться: відсутність інтерференційних фільтрів, нескладна конструкція, невеликі габарити і маса, джерело живлення невисокої напруги. Прилад не вимагає висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

### 3. МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК

При вимірюванні потоку випромінювання твердих частинок, які знаходяться у високотемпературному двофазному струмені газ-тверді частинки, застосовують пасивний метод роботи ОЕП [1] (рис. 3.1).

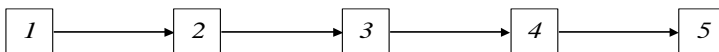


Рис. 3.1. Структурна схема ОЕП з пасивним методом роботи:  
1 – струмись газ-тверді частинки; 2 – об’єктив; 3 – приймач випромінювання; 4 – підсилювач сигналу; 5 – вольтметр

Діапазоном вимірювання потоку випромінювання твердих частинок вибирають ділянку («вікно» прозорості 4), яка знаходиться в області спектру електромагнітних хвиль 0,5...1,1 мкм (рис. 3.2) [2, 3, 4].

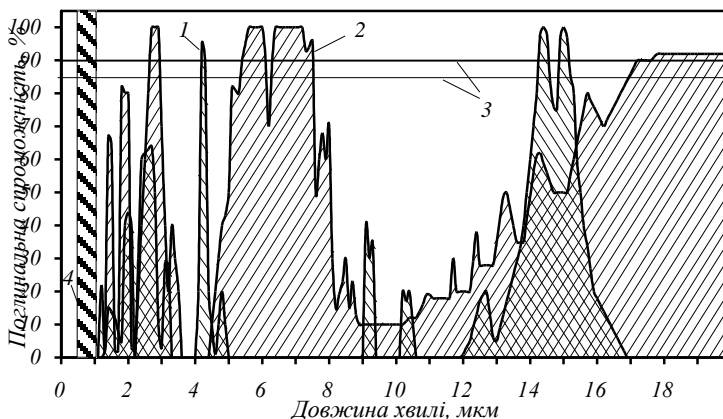


Рис. 3.2. Схема вибору діапазону вимірювання потоку випромінювання твердих частинок:  
1 – вуглекислий газ; 2 – водяна пара; 3 – тверді частинки;  
4 – смуга спектру вимірювання потоку випромінювання твердих частинок

Вимірювання потоку випромінювання твердих частинок виконують безконтактним методом з використанням оптико-електронного приладу, показаного на рис. 3.3.

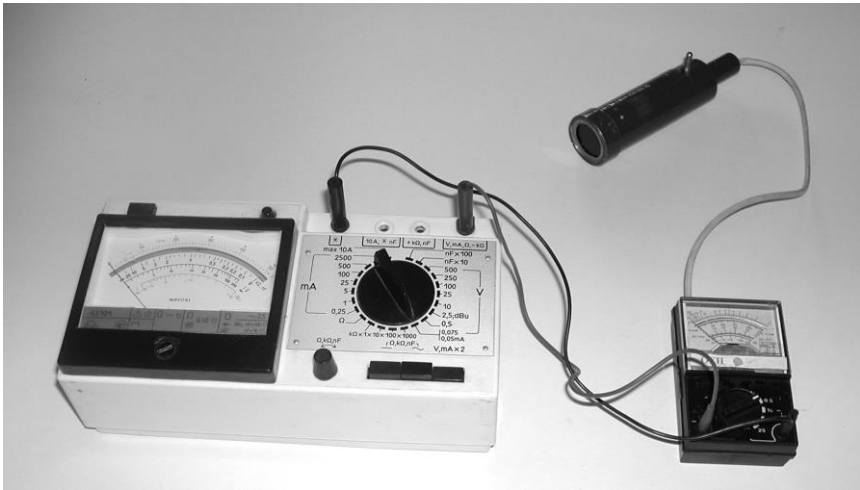


Рис. 3.3. ОЕП з додатковим приладом мод. 43101

З метою створення високотемпературного двофазного струменя газ-тверді частинки використовують пост газополуменевого напильювання покриттів (ГПН), показаного на рис. 3.4.

Фактори формування полум'я газового пальника, такі як тиск кисню, тиск та витрати ацетилену приймають незмінними та встановлюють на необхідному рівні з заданою точністю відповідно з технічними характеристиками газового пальника. Для зниження тиску газу і автоматичної підтримки робочого тиску постійним застосовано редуктори балонні газові мод. БКО-25-2 та БАО-5-2. Для вимірювання і точного регулювання витрат газів використано ротаметри мод. ДЕМ 348601П [3].

При горінні пальної суміші пальника формується двофазний струмінь газ-тверді частинки (рис. 3.5). На установці, показаній на рис. 3.6 та рис. 3.7, встановлюють пальник та перетворювач випромінювання-електричний сигнал ОЕП на відстані 0,3 м від осі струменя пальника. З метою недопущення нагрівання корпусу перетворювача, а разом з ним фотодіода, в корпус перетворювача, який має подвійні стінки, подають стиснуте повітря.

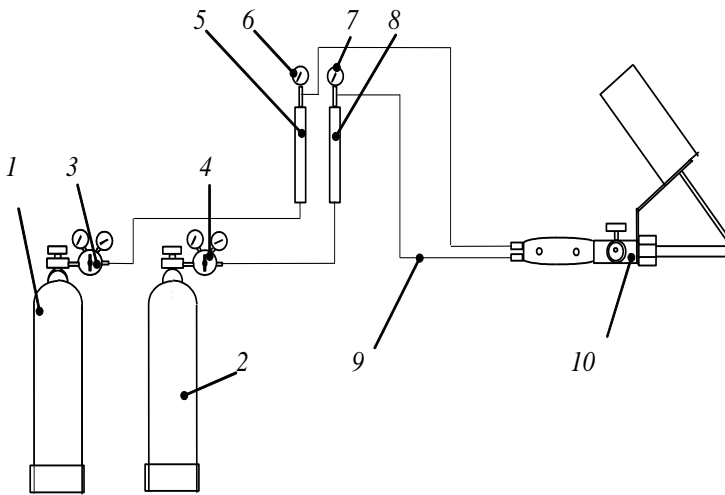


Рис. 3.4. Схема поста ГПН покриттів:

- 1, 2 – балони кисневий та ацетиленовий; 3, 4 – редуктори кисневий та ацетиленовий; 5, 8 – ротаметри кисневий та ацетиленовий;  
 6, 7 – манометри кисневий та ацетиленовий; 9 – газові рукави;  
 10 – апарат мод. ГАЛ-6-73

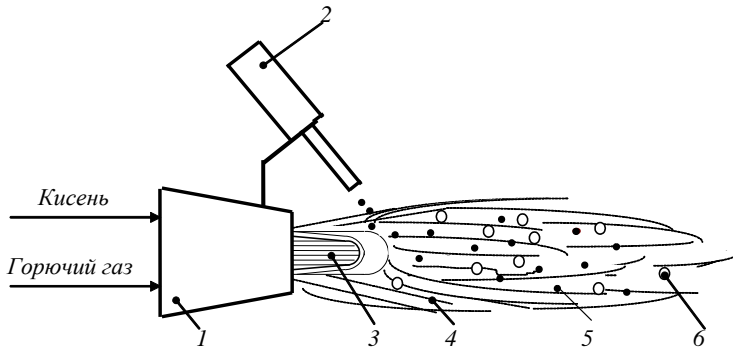


Рис. 3.5. Схема формування двофазного потоку апарата ГПН покриттів:

- 1 – паличник; 2 – порошковий дозатор; 3 – ядро полум'я;  
 4 – газовий струмінь; 5 – тверді тіла; 6 – молекули та атоми газоподібних продуктів

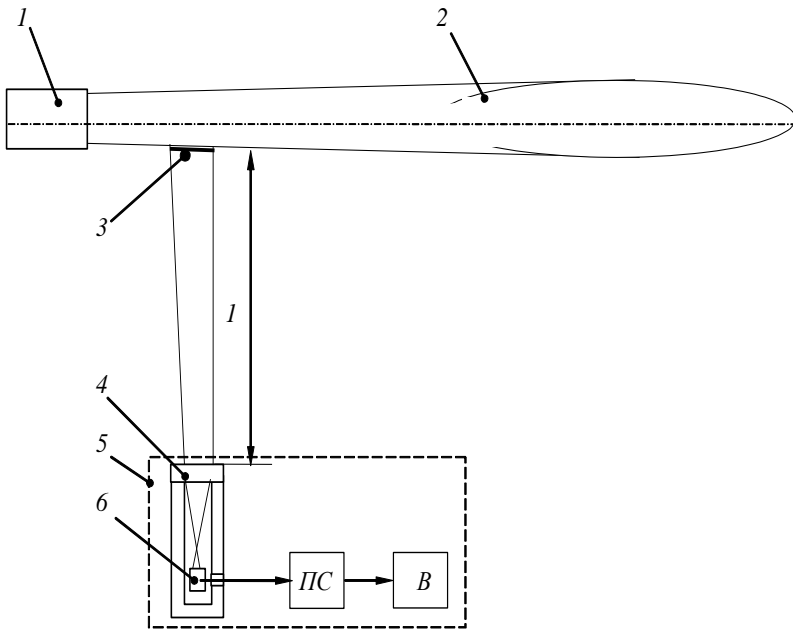


Рис. 3.6. Схема установки вимірювання потоку випромінювання сажового вуглецю полум'я:

$l$  – апарат мод. ГАЛ-6-73; 2 – полум'я; 3 – майданчик візування;  
 4 – об'єктив; 5 – ОЕП; 6 – приймач випромінювання;  $f_2$  – відстань від  
 об'єктива до майданчика візування; ПС – підсилювач сигналу;  
 В – вольтметр [3]

Об'єктив 4 ОЕП 5 вирізує майданчик візування 3 (рис. 3.6). При цьому: майданчик візування розміщують за межами ядра полум'я; матеріал напилування у газовий струмінь не подають. Вимірювання потоку випромінювання полум'я виконують фотодіодом ФД-25К 6, сигнал з останнього подано через підсилювач сигналу ПС на вольтметр В [2, 4]. Шкалу приладу градуують в умовних одиницях або використовують прилад з градуйованою шкалою в вольтах.

Перед проведенням вимірювань повинні бути виконані наступні підготовчі роботи:

1. Виконати зовнішній огляд ОЕП. При проведенні зовнішнього огляду повинна бути встановлена відповідність ОЕП наступним вимогам:





Рис. 3.7. Установа вимірювання потоку випромінювання полум'я пальника

- ОЕП не повинен мати механічних пошкоджень: вм'ятин, тріщин;
- скло світлофільтра повинно бути без подряпин, бруду та інших дефектів, які заважають проходженню світлових променів;
- скло пристрою відліку повинно бути без подряпин та інших дефектів, які заважають відліку показів.

При наявності подібних дефектів ОЕП не може бути допущений до подальшої роботи.

2. Встановити перемикач діапазону вимірювання в положення «25».
3. Ввімкнути вимикач живлення.

При запалюванні пальника подають мінімальну кількість кисню, а в наступних дослідах витрати кисню збільшують дискретно з кроком  $h = 0,5$  л/хв. При цьому виконують вимірювання витрат газів за допомогою ротаметрів та напруги на виході ОЕП.

Результати  $n$  повторних вимірювань параметрів заносять в таблицю.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Ночвай В. М. Встановлення зв'язку між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Практична космонавтика і високі технології : VI Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 100-річчю з дня народж. акад. С. П. Корольова, 9–11 січ. 2007 р. : тези доп. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – С. 95–96.

2. Пат. 76332 Україна, МПК F23N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041008025 ; заявл. 04.10.04 ; опубл. 17.07.06, Бюл. № 7.

3. Ночвай В. М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 6. – С. 30–40.

4. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2006. – № 4. – С. 69–76.

## 4. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЙ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ КИСНЮ ПАЛЬНИКА

### 4.1. Постановка задачі

Для якісного проведення технологічних процесів газового зварювання, газополуменевого напилювання необхідно підтримувати певне співвідношення кисню та горючого газу, причому для різних матеріалів, що обробляються, це співвідношення повинно знаходитися в різних межах. Від співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші залежить тип полум'я, його ефективна потужність і температура.

В роботі [1] розроблено метод контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в пальній суміші пального. Метод забезпечує повне згорання горючого газу та кисню без залишку, так як, контроль повного згорання горючого газу ведеться не по потоку випромінювання газоподібних продуктів згорання пальної суміші пального, а по потоку випромінювання залишку горючого газу в формі атомарного вуглецю (сажі) за межами ядра полум'я. В роботі приведено значення абсолютної систематичної похибки вимірювання напруги на виході оптико-електронного приладу (ОЕП), яка дорівнює 0,044 В. Сумарна похибка результату визначення витрат кисню дорівнює 3,9 %.

Операції вимірювання витрат робочих газів та напруги на виході ОЕП виконують за допомогою простих приладів і не потребують високого рівня кваліфікації оператора [1].

Метою роботи є дослідження швидкодій контролю витрат кисню пального, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу у пальній суміші пального.

### 4.2. Планування експерименту

Вхідним фактором об'єкта дослідження обрано витрати кисню. Одиниця вимірювання витрат кисню та ацетилену – л/хв.

Вихідним фактором є потік випромінювання сажового вуглецю, що знаходиться в високотемпературному газовому потоці пального. Вимірювання потоку випромінювання сажового вуглецю виконано ОЕП, одиниця вимірювання напруги на виході ОЕП – вольт, одиниця вимірювання часу контролю витрат кисню – секунда. Зміну витрати кисню виконано з кроком  $V_k = 0,5$  л/хв.

Експеримент складається з  $N$  дослідів, пронумерованих індексами  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Дослід складається з  $n = 11$  повторних вимірів часу  $t$  виконання контролю витрат кисню в пальній суміші пальника, пронумерованих індексами  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

План експерименту задано в формі матриці планування – прямокутної таблиці, кожна колонка якої відповідає умовам конкретного дослідів, а рядки – значенням незалежної змінної в різних дослідів експерименту (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

**Матриця планування експерименту**

Номер дослідів, $i$	Витрати кисню $V_k, \text{л/хв}$	Напруга на виході ОЕП $U, \text{В}$	Час контролю $t$ , сек при повторних вимірах $n = 11$ :				
			1	...	$j$	...	$N$
1	$V_{k1}$	$U_1$	$t_{N1}$	...	$t_{Nj}$	...	$t_{Nn}$
2	$V_{k2}$	$U_2$					
⋮	⋮	⋮					
$i$	$V_{ki}$	$U_i$					
⋮	⋮	⋮					
$N-1$	$V_{kN-1}$	$U_{N-1}$					
$N$	$V_{kN}$	$U_N$					

Фактори формування полум'я пальника, такі як тиск кисню, тиск та витрати ацетилену прийнято незмінними та встановлено на необхідному рівні з заданою точністю (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

**Значення незмінних факторів при проведенні експерименту**

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення параметра
Витрати ацетилену	л/хв	6,6
Тиск кисню	МПа	0,5
Тиск ацетилену	МПа	0,1

З метою визначення швидкодії контролю витрат кисню пальника виконано вимірювання часу контролю витрат кисню. Вимірювання часу виконано за допомогою секундоміра.

### 4.3. Проведення експерименту

При проведенні дослідження швидкодії контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та ацетилену в пальній суміші, застосовано пост ГПН покриттів (рис. 3.4) та застосовано установку, яку показано на рис. 3.6. Змінним фактором прийнято витрати кисню і встановлено на заданому рівні (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

**Значення витрат кисню при проведенні експерименту**

Номер досліджу, $i$	Витрати кисню $V_k$ , л/хв	Номер досліджу, $i$	Витрати кисню $V_k$ , л/хв	Номер досліджу, $i$	Витрати кисню $V_k$ , л/хв
1	4,0	4	5,5	7	7,0
2	4,5	5	6,0	8	7,5
3	5,0	6	6,5	9	8,0

Початковою точкою руху робочої точки по характеристиці об'єкта вибрано значення витрат кисню  $V_k = 4$  л/хв. Початковий напрям руху робочої точки по характеристиці об'єкта вибрано в сторону збільшення  $V_k$  і зміну параметра виконано з кроком  $V_k = 0,5$  л/хв (рис. 4.1).

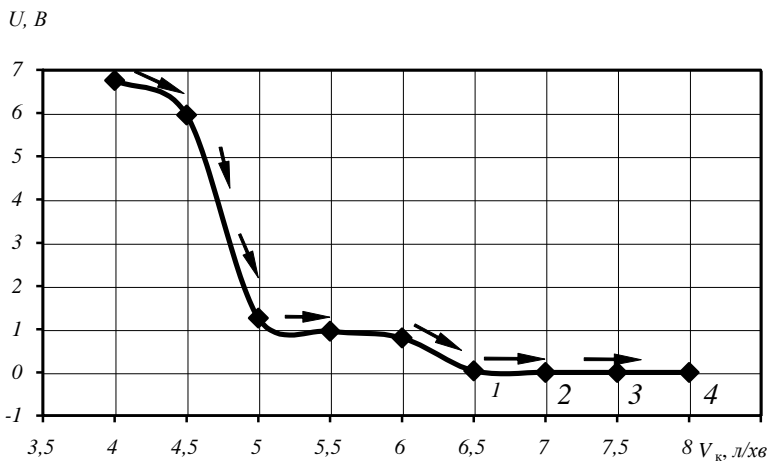


Рис. 4.1. Залежність напруги на виході ОЕП від витрат кисню (витрати ацетилену 6,6 л/хв)

При виконанні дослідів виконано вимірювання витрат кисню, напруги на виході ОЕП та часу контролю. Відлік часу розпочато одночасно з виконанням першого досліді і закінчено при значенні напруги на виході ОЕП, яке знаходиться в допусковому інтервалі  $U_H \leq U \leq U_B$  з врахуванням поправки  $c = -0,044$  В (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

**Результати вимірювань напруги та часу контролю витрат кисню  $V_{кк}$**

Номер досліді, $i$	Витрати кисню, $V_{кк}$ , л/хв	Напруга на виході ОЕП $U$ , В	Час контролю $t$ , сек при повторних вимірах $n = 11$ :																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11							
1	4,0	6,8																		
2	4,5	6,0																		
3	5,0	1,3																		
4	5,5	1,0	6	7	6	6	6	7	6	5	5	6	6							
5	6,0	0,84																		
6	6,5	0,08																		
7	7,0	0,044																		

4.4. Статистична обробка результатів експерименту

Передбачається, що систематичні похибки відсутні. Відхилення результатів носить випадковий характер, що підкоряється нормальному закону розподілу. З метою одержання достовірних значень обмірюваної величини визначено її середнє арифметичне значення та величину похибки експерименту.

Середнє арифметичне значення часу контролю визначено за виразом

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j, \quad (4.1)$$

де  $\bar{t}$  – середнє арифметичне значення часу виконання контролю;

$t_j$  – час контролю  $j$  – того повтору досліді [2],

і дорівнює 6 сек.

Отже, швидкодія контролю витрат кисню в пальній суміші газового пального 6 сек.

Вибіркові дисперсії  $j$ -того повтору досліді визначено за виразом

$$S(t) = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^n (t_j - \bar{t})^2, \quad (4.2)$$

де  $S(t)$  – дисперсія випадкових величин результатів вимірювань [3].

Для визначення значення дисперсії використовується одна константа  $t_j$ . Звідси  $f = n - 1 = 11 - 1 = 10$ , а  $S(t) = 0,4$ .

Експериментальне середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань та середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного визначено відповідно за формулами:

$$\sigma(t) = \pm \sqrt{S(t)}; \quad \bar{\sigma}(\bar{t}) = \frac{\sigma(t)}{\sqrt{n}}, \quad (4.3)$$

де  $\sigma(t)$  – експериментальне середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань величини  $t$ ;

$\bar{\sigma}(\bar{t})$  – середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення величини  $t$  [4]

і відповідно дорівнюють 0,6325 та 0,1907.

Визначення грубих похибок дослідів виконано за критерієм К. Пірсона та Н. Смирнова шляхом визначення величини

$$T_{\max} = (t_{\max} - \bar{t}_i) / \sigma(t), \quad (4.4)$$

де  $t_{\max}$  – найбільше значення результату дослідів [2]

і отримано:  $(7 - 6) / 0,6325 = 1,5810$ . Для  $n = 11$  табличне значення  $T_{\text{кр}(0,05)}$  дорівнює 2,343 (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

**Розподіл та критичні точки величини  $T_{\max}$  [2]**

Кількість дослідів, $N$	Рівень значимості при $\alpha = 0,05$	Кількість дослідів, $N$	Рівень значимості при $\alpha = 0,05$	Кількість дослідів, $N$	Рівень значимості при $\alpha = 0,05$
4	1,689	8	2,172	12	2,387
5	1,869	9	2,237	13	2,426
6	1,996	10	2,294	14	2,461
7	2,093	11	2,343	15	2,493

Так як розрахункове значення  $1,5810 < 2,343$ , то перевірений дослід  $t_2$  не є грубою похибкою і його результат не відсівається.

Довірчий інтервал визначено за критерієм Стьюдента [4]

$$\Delta_d = \pm t_p \bar{\sigma}(\bar{t}) \quad (4.5)$$

і при  $k = n - 1 = 11 - 1 = 10$  та  $t_p = 2,23$  (табл. 4.6) отримано значення довірчого інтервалу:  $\Delta_d = \pm 1,41$  сек.

Таблиця 4.6

**Значення  $t_p$ ,  $t_p / \sqrt{n}$  та в залежності від довірчої імовірності  $P = 0,95$  і**

**$k = n - 1$  (значення  $t_p$  задовільняють рівність  $2 \int_0^{t_p} \sigma(t, k) dt = p$ ) [5]**

$k$	$t_p$	$t_p / \sqrt{n}$	$k$	$t_p$	$t_p / \sqrt{n}$	$k$	$t_p$	$t_p / \sqrt{n}$
1	12,71	9,0	10	2,23	0,67	19	2,09	0,47
2	4,30	2,5	11	2,20	0,65	20	2,09	0,47
3	3,18	1,59	12	2,18	0,60	30	2,04	0,37
4	2,78	1,24	13	2,16	0,58	40	2,02	0,32
5	2,57	1,05	14	2,14	0,55	50	2,01	0,28
6	2,45	0,93	15	2,13	0,53	100	1,98	0,20
7	2,36	0,84	16	2,12	0,51	200	1,97	0,14
8	2,31	0,77	17	2,11	0,50	$\infty$	1,96	0
9	2,26	0,72	18	2,10	0,48			

4.5. Перевірка гіпотези підпорядкування відхилень результатів вимірювань нормальному закону розподілу

Перевірку гіпотези, що відхилення результатів вимірювань підкоряється нормальному закону розподілу, виконано за критерієм згоди Колмогорова

$$\lambda_i = \left| F'(z_{i\psi}) - F(z_{i\psi}) \right|_{\max} \sqrt{n}, \quad (4.6)$$

де  $|F'(z_{i\psi}) - F(z_{i\psi})|$  – максимальна різниця в досліджуваних інтервалах;  
 $n$  – кількість вимірювань.

Якщо  $P(\lambda_i) > 0,05$ , то розподіл підпорядкований нормальному закону [6].



Розрахунки значення  $\lambda_i$  виконано згідно з методикою, приведеною нижче.

В формулах (4.6 – 4.17) виконано заміну  $z = t$ .

Зону розсіювання результатів вимірювань визначено за формулою

$$R_i = z_{i\max} - z_{i\min}. \quad (4.7)$$

де  $R_i$  – зона розсіювання випадкових величин результатів вимірювань;

$z_{i\max}$  – найбільше значення випадкової величини  $i$ -того дослідю;

$z_{i\min}$  – найменше значення випадкової величини  $i$ -того дослідю [6].

Кількість інтервалів  $g$  визначено за формулою

$$g = 1 + 1,443 \cdot \ln n, \quad (4.8)$$

де  $g$  – кількість інтервалів, в яких розподілені випадкові величини результатів вимірювань [6], і отримано:  $1 + 1,443 \cdot \ln 11$ , яку округлено до найбільшого значення, тобто  $g = 5$ .

Ширину інтервалу  $h_i$   $i$ -того дослідю визначено за формулою

$$h_i = \frac{R_i}{g}, \quad (4.9)$$

де  $h_i$  – ширина інтервалу потрапляння результатів вимірювань  $i$ -того дослідю.

Межі  $\psi$ -того інтервалу  $i$ -того дослідю визначено за формулами

$$a_{i\psi} = z_{i\min} + h_i(\psi - 1), \quad b_{i\psi} = z_{i\min} + h_i\psi, \quad (4.10)$$

де  $a_{i\psi}$  – нижня межа  $\psi$ -того інтервалу  $i$ -того дослідю;

$b_{i\psi}$  – верхня межа  $\psi$ -того інтервалу  $i$ -того дослідю [6].

Середину  $\psi$ -того інтервалу  $i$ -того дослідю визначено за формулою

$$z_{i\psi} = z_{i\min} + 0,5 \cdot h_i \cdot (2\psi - 1), \quad (4.11)$$

де  $z_{i\psi}$  – значення середини  $\psi$ -того інтервалу  $i$ -того дослідю [6].

Частоту потрапляння  $m_{i\psi}$  результатів вимірювань  $i$ -того дослідю в кожний інтервал визначено за умови, що

$$a_{i\psi} \leq z_{i\psi} < b_{i\psi}, \text{ або } a_{i\psi} \leq z_{i\psi} \leq b_{i\psi}.$$

Після підстановки чисельних значень алгебраїчних величин в формули (4.7 – 4.11) і виконання розрахунків отримано перетворені дані емпіричного розподілу результатів вимірювань (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

**Перетворені дані емпіричного розподілу результатів вимірювань**

Номер кроку $i$	Зона розсіювання $R$	Ширина інтервалу $h$	Номер інтервалу $\psi$	Межі інтервалу		Середини інтервалів $t_{\psi}$	Частота потрапляння $m_{\psi}$
				$a_{\psi}$	$b_{\psi}$		
7	2,0	0,40	1	5,00	5,40	5,20	2
			2	5,40	5,80	5,60	0
			3	5,80	6,20	6,00	7
			4	6,20	6,60	6,40	0
			5	6,60	7,00	6,80	2

Значення емпіричної функції закону розподілу випадкових величин результатів вимірювань визначено за формулою

$$F(z_{i\psi}) = \frac{m_{i\psi}}{n}, \quad (4.12)$$

де  $m_{i\psi}$  – емпірична частота потрапляння значення випадкової величини результату вимірювання  $i$ -того досліді в  $\psi$ -тий інтервал [6].

Значення теоретичної функції закону розподілу випадкових величин результатів вимірювань визначено за формулою

$$F'(z_{i\psi}) = \frac{m'_{i\psi}}{n}, \quad (4.13)$$

де  $m'_{i\psi}$  – теоретична частота потрапляння випадкової величини результату вимірювання  $i$ -того досліді в  $\psi$ -тий інтервал [6].

Значення теоретичної частоти потрапляння випадкової величини результату вимірювання  $i$ -того досліді в  $\psi$ -тий інтервал визначено за формулою

$$m'_{i\psi} = \left( \frac{nh_i}{\bar{\sigma}_i \sqrt{2\pi}} \right) e^{-0,5w_{i\psi}^2}, \quad (4.14)$$

де  $w_{i\psi}$  – нормована координата середини  $\psi$ -того інтервалу  $i$ -того досліді;  
 $\bar{\sigma}_i$  – значення теоретичного середнього квадратичного відхилення результату кожного  $i$ -того досліді [6].

Значення нормованої координати середини кожного інтервалу результатів вимірювань кожного досліді визначено за формулою

$$w_{i\psi} = \frac{z_{i\psi} - \bar{z}_i}{\bar{\sigma}_i}, \quad (4.15)$$

де  $\bar{z}_i$  – середнє арифметичне значення результату вимірювання кожного  $i$ -того досліді [6].

Середнє арифметичне значення результату вимірювання кожного  $i$ -того досліді визначено за формулою

$$\bar{z}_i = \frac{\sum_{\psi=1}^g z_{i\psi} m_{i\psi}}{\sum_{\psi=1}^g m_{i\psi}}. \quad (4.16)$$

Значення теоретичного середнього квадратичного відхилення результату кожного  $i$ -того досліді визначено за формулою

$$\bar{\sigma}_i = \sqrt{\frac{\sum_{\psi=1}^g (z_{i\psi} - \bar{z}_i)^2 m_{i\psi}}{\sum_{\psi=1}^g m_{i\psi}}}. \quad (4.17)$$

Після підстановки чисельних значень алгебраїчних величин в формули (4.12 – 4.17) отримано результати перевірки гіпотези підпорядкування відхилень результатів вимірювань нормальному закону розподілу (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

**Результати перевірки гіпотези про відповідність нормальному закону розподілу**

Номер кроку $i$	Номер інтервалу $\psi$	Середини інтервалів $t_j$	Частота потрапляння $m$	$F(t_\psi)$	$w_\psi$	$m'_\psi$	$F'(t_\psi)$	$\lambda$
7	1	5,20	2	0,182	-1,658	0,920	0,084	1,01
	2	5,60	0	0	-0,829	2,580	0,235	
	3	6,00	7	0,636	0	3,639	0,331	
	4	6,40	0	0	0,829	2,580	0,235	
	5	6,80	2	0,182	1,658	0,920	0,084	

За значенням  $\lambda$  визначено ймовірність  $P(\lambda)$  його появи. Розрахункове значення  $\lambda = 1,01$  порівняно з даними табл. 4.9. Значення  $\lambda_1 = 1,01$  знаходиться між табличними значеннями 1,0 та 1,10, яким відповідають значення ймовірності 0,27 та 0,1777 (табл. 4.9).

Таблиця 4.9

**Значення ймовірності  $P(\lambda)$  в залежності від  $\lambda$  [6]**

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,30	1,0000	0,65	0,7920	1,00	0,2700	1,70	0,0062
0,35	0,9997	0,70	0,7112	1,10	0,1777	1,80	0,0032
0,40	0,9972	0,75	0,6272	1,20	0,1122	1,90	0,0015
0,45	0,9874	0,80	0,5441	1,30	0,0681	2,00	0,0007
0,50	0,9639	0,85	0,4653	1,40	0,0393	2,10	0,0003
0,55	0,9228	0,90	0,3927	1,50	0,0222	2,20	0,0001
0,60	0,8643	0,95	0,3275	1,60	0,0122	2,30	0,0001

Шукане значення  $P(\lambda)$  визначено за допомогою лінійної гармонічної інтерполяції. Розрахунок значення функції  $f(v)$  при заданих значеннях аргументу  $v$ ,  $v^0$ ,  $v^1$  ( $v^0 > v > v^1$ ) та значеннях функцій  $f_0 = f(v^0)$ ,  $f_1 = f(v^1)$  виконано за формулою лінійної гармонічної інтерполяції

$$f(v) = f_0 + u \cdot \Delta f_0, \quad (4.18)$$

де  $f(v)$  – шукане значення функції;

$u$  – фаза інтерполяції;

$$\Delta f_0 = f_1 - f_0;$$

$f_0$ ,  $f_1$  – табличні значення функцій [7].

Значення фази інтерполяції визначено за виразом

$$u = v^{(1)} \cdot (v^{(0)} - v) / v \cdot (v^{(0)} - v^{(1)}), \quad (4.19)$$

де  $v, v^{(0)}, v^{(1)}$  – значення аргументу функцій [7].

Задано:  $\lambda = 1,01$ . Визначити значення  $P(\lambda)$ .

Табличні значення аргументу функції  $\lambda_{\text{табл}} = 1,0$  та  $\lambda_{\text{табл}} = 1,10$ , яким відповідають значення функції  $P(\lambda)_{\text{табл}} = 0,27$  та  $P(\lambda)_{\text{табл}} = 0,1777$ . Значення аргументів функції відповідно позначень наступні:  $v = \lambda = 1,01$ ;  $v^{(0)} = \lambda_{\text{табл}} = 1,10$ ;  $v^{(1)} = \lambda_{\text{табл}} = 1,0$ . Значення функції відповідно позначень наступні:  $f_0 = P(\lambda)_{\text{табл}} = 0,27$ ,  $f_1 = P(\lambda)_{\text{табл}} = 0,1777$ . Тоді  $\Delta f_0 = 0,27 - 0,1777 = 0,0923$ .

Після підстановки значення аргументів функції  $v, v^{(0)}, v^{(1)}$  в рівняння (4.19) отримано:  $u = 1,0 (1,10 - 1,01) / 1,01 \cdot (1,10 - 1,0) = 0,909$ .

Після підстановки значення  $f_0, u, \Delta f_0$  в рівняння (4.18) отримано:  $f(v) \approx 0,1777 + 0,909 \cdot 0,0923 \approx 0,2616$ . Звідси шукане значення  $P(\lambda) = f(v) \approx 0,2616$ .

Так як ймовірність  $P(\lambda) = 0,2616 > 0,05$ , то розподіл відхилення результатів вимірювань підпорядкований нормальному закону. На підставі перетворених даних (табл. 4.7) побудовано гістограму 1 та полігон 2 емпіричного розподілу, а за значеннями теоретичної частоти (табл. 4.8) побудовано вирівнювальну криву 3 закону нормального розподілу випадкових величин досліджу (рис. 4.2).

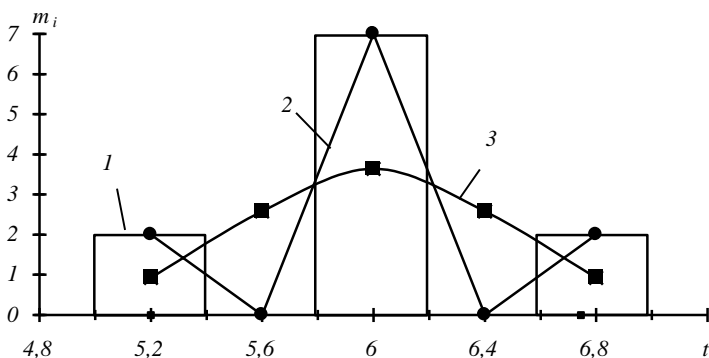


Рис. 4.2. Емпіричний розподіл випадкових величин досліджу: 1 – гістограма; 2 – полігон; 3 – вирівнювальна крива нормального розподілу

#### 4.6. Висновок

1. Операції вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю не вимагають багато часу їх виконання, що дало можливість підвищити швидкодню контролю витрат кисню в пальній суміші газового пальника до 6 сек.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Ночвай В. М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 6. – С. 30–40.

2. Петрук В. Г. Основи науково-дослідної роботи [Текст] : навч. посіб. / В. Г. Петрук, Є. Т. Володарський, В. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 144 с. – ISBN 966-641-164-4.

3. Автоматизация типовых технологических процессов и установок [Текст] : учеб. для вузов / А. М. Корьтин, Н. К. Петров, С. Н. Радимов, Н. К. Шапарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 432 с. – ISBN 5-283-00506-2.

4. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю [Текст] : навч. посіб. / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с. – ISBN 966-7993-18-3.

5. Преображенський В. П. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] : учеб. для вузов / В. П. Преображенський. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.

6. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія і практикум з програмним забезпеченням [Текст] : навч. посіб. / В. В. Душинський. – К. : НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.

7. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики [Текст] / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М. : Наука, 1965. – 464 с.

## 5. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ КИСНЮ ПАЛЬНИКА

Кількісною оцінкою вимірювального контролю є абсолютна вірогідність, яка представляє ймовірність правильного розв'язку при контролі витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та ацетилену у пальній суміші пальника. Значення абсолютної вірогідності розраховано за формулою

$$D_{\text{абс}} = P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{помилко}} , \quad (5.1)$$

де  $D_{\text{абс}}$  – абсолютна вірогідність;

$P_{\text{пр}}$  – ймовірність правильного розв'язку при визначенні величини параметра;

$P_{\text{помилко}}$  – ймовірність помилкового розв'язання рішення [1, 2].

Ймовірність помилкового розв'язання рішення внаслідок похибок вимірювань визначено за формулою

$$P_{\text{помилко}} = \alpha + \beta , \quad (5.2)$$

де  $\alpha, \beta$  – помилки першого та другого роду відповідно [1, 2].

Значення помилок першого та другого роду визначено за формулами:

$$\alpha = \int_{V_{\text{кН}}}^{V_{\text{кВ}}} P(V) \int_{-\infty}^{V_{\text{кН}}-V} P(\Delta) d\Delta dV + \int_{V_{\text{кН}}}^{V_{\text{кВ}}} P(V) \int_{V_{\text{кВ}}-V}^{+\infty} P(\Delta) d\Delta dV ;$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{V_{\text{кН}}} P(V) \int_{V_{\text{кН}}-V}^{V_{\text{кВ}}-V} P(\Delta) d\Delta dV + \int_{V_{\text{кН}}}^{+\infty} P(V) \int_{V_{\text{кН}}-V}^{V_{\text{кВ}}-V} P(\Delta) d\Delta dV ,$$
(5.3)

де  $P(V)$  – густина розподілу ймовірностей параметра;

$P(\Delta)$  – густина розподілу ймовірностей похибки;

$V_{\text{кН}}$  – значення нижнього допуску;

$V_{\text{кВ}}$  – значення верхнього допуску;

$V$  – фіксоване значення параметра [1, 2], яке визначено при виконанні активного контролю витрат кисню пальника, дорівнює 10,0 л/хв і відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та ацетилену у пальній суміші при витратах ацетилену 9,0 л/хв. Прийнято як фіксоване

значення параметра в розрахунках оцінки вірогідності вимірювального контролю.

Так як значення витрат кисню при проведенні експерименту приймає значення від 0 до 11 л/хв, то формули (5.3) приймають вид:

$$\alpha = \int_{V_{кН}}^{V_{кБ}} P(V) \int_0^{V_{кН}-V} P(\Delta) d\Delta dV + \int_{V_{кН}}^{V_{кБ}} P(V) \int_{V_{кБ}-V}^{11} P(\Delta) d\Delta dV \quad (5.4)$$

$$\beta = \int_0^{V_{кН}} P(V) \int_{V_{кН}-V}^{V_{кБ}-V} P(\Delta) d\Delta dV + \int_{V_{кБ}}^{11} P(V) \int_{V_{кН}-V}^{V_{кБ}-V} P(\Delta) d\Delta dV .$$

Схему виникнення помилкових рішень показано на рисунку 5.1. Області значень  $V_k$ , які відповідають помилковим рішенням показані заштрихованими.

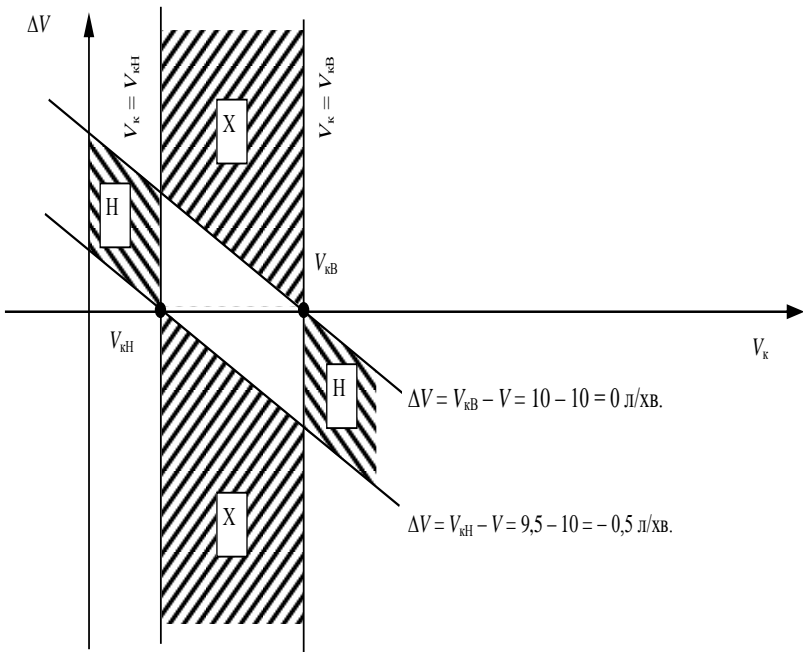


Рис. 5.1. Виникнення помилкових рішень при контролі витрат кисню:  
 X – хибна відмова; H – невизначена відмова



Випадкові величини результату визначення витрат кисню підпорядковані нормальному закону розподілу. Тоді густину ймовірності розподілу випадкових величин параметра визначено за формулою

$$P(V) = \frac{1}{\sigma(V) \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(V_{к5} - V)^2}{2 \cdot \sigma^2(V)}\right], \quad (5.5)$$

де  $\sigma(V)$  – середнє квадратичне відхилення випадкової величини результату визначення витрат кисню;

$V_{к5}$  – найменше значення результату визначення витрат кисню [1].

Середнє квадратичне відхилення результату визначення витрат кисню визначено за формулою [3]

$$\sigma(V) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (V_{kj} - V)^2} \quad (5.6)$$

і при  $V = 10$  л/хв дорівнює 0,350 л/хв.

Після підстановки значення  $\sigma(V) = 0,350$  л/хв та  $V_{к5} - V = 9,334 - 10,0 = 0,666$  л/хв в формулу (5.5) отримано:  $P(V) = 0,186$  (л/хв)<sup>-1</sup>.

Після підстановки в формули (5.4) значення нижнього  $V_{кН} = 9,5$  л/хв та верхнього  $V_{кВ} = 10,0$  л/хв допусків, а також фіксованого значення  $V = 10,0$  л/хв, значення густини розподілів ймовірностей параметра  $P(V)$  і похибок  $P(\Delta)$  отримано:  $\alpha = 0,149$ ;  $\beta = 0,149$ . Тоді  $P_{\text{помилко}} = 0,298$ .

Нижнє граничне значення абсолютної вірогідності контролю дорівнює  $D_{\text{абс}} = 1 - 0,298 = 0,702$ , а оцінку умовної вірогідності прийняття правильного рішення визначено за виразом

$$D_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пр}}(1-\alpha)}{P_{\text{пр}}(1-\alpha) + P_{\text{помилко}} \cdot \beta}, \quad (5.7)$$

де  $D_{\text{пр}}$  – умовна вірогідність прийняття правильного рішення [2]

і отримано:  $D_{\text{пр}} \geq 0,941$ .

Значення довірчої ймовірності розраховано з нерівності Кампа-Мейделя

$$P_{\text{дов}} \geq z \cdot \sigma \geq \frac{1-4\sigma^2}{9\Delta}, \quad (5.8)$$

де  $P_{\text{дов}}$  – довірча ймовірність правильного розв’язку при визначенні величини параметра;  $z = \Delta / \sigma$  [2], і дорівнює 0,911.

### **Висновки**

Так як значення абсолютної вірогідності контролю витрат кисню дорівнює  $D_{\text{абс}} = 0,702$ , а оцінка умовної вірогідності прийняття правильного рішення дорівнює  $D_{\text{пр}} \geq 0,931$  при значенні довірчої ймовірності  $P_{\text{дов}} = 0,911$ , то можна зробити висновок про достатньо високий ступінь вірогідності вимірювального контролю.

### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. посіб. / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.
2. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ : теорія і практика оптичного вимірювального контролю / В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 207 с.
3. Петрук В. Г. Основи науково-дослідної роботи : навч. посіб. / В. Г. Петрук, Є. Т. Володарський, В. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 144 с.

## Частина 2. ПУБЛІКАЦІЇ

*Опубліковано в тезах доповідей Респуб. науч.-техн. конф.  
23-24 травня 1990 р. «Повышение эффективности  
производства машиностроительных предприятий»  
Душанбе : ТаджикНИИНТИ, 1990. – С. 110–111.*

### ВИЗНАЧЕННЯ ДИСТАНЦІЇ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЮВАННЯ

В.М. Ночвай, В.В. Серов, А.Г. Тютюнник

Міцність покриття, отриманого газополуменевим напилюванням, та його фізико-механічні властивості залежать від температури напилюваних частинок в момент зіткнення з деталлю. Частинки матеріалу, які попадають в струмінь та рухаючись в потоці продуктів згорання, нагріваються, а потім охолоджуються разом з останніми. Оптимальним для напилювання є момент нагрівання частинок до найвищої температури, який залежить від витрат матеріалу, що напилюють, горючого газу та окислювача, але в прийнятій техніці напилювання дистанція встановлюється виходячи з практичних даних, разом з тим при цьому не враховується характер зміни температури частинок. Це приводить до перевитрат матеріалів та зниження якості покриття. В роботі зроблена спроба визначити дистанцію напилювання по точці найвищого підйому температури частинок на шляху їх руху.

Процес напилювання досліджувався з використанням киснево-ацетиленового розпилювального пальника ГАЛ-6 з пристроєм, який забезпечує його переміщення відносно поверхні деталі. Контроль температури проводився по густині потоку випромінювання частинок пристроєм, в якому датчиком слугує германієвий фотодіод з смугою пропускання 0,5...1,2 мкм. Це дозволило ліквідувати вплив випромінювання продуктів згорання. Датчик візували по осі струменя, діаметр майданчика візування – 10 мм.

Вимірювання показали, що дистанція, на якій проходить нагрівання частинок до максимальної температури, залежить від витрат частинок, що напилюють. При постійних витратах горючого газу та окислювача, при однаковій тепловій потужності струменя, прогрівання частинок до максимальної температури проходить на більшій відстані від сопла пальника при більших витратах порошку.

## **О МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИХ ВЛАГОМЕРОВ, ИНВАРИАНТНЫХ К АКТИВНЫМ ПОТЕРЯМ**

А.И. Тютюнник, А.Н. Коваль, Д.Е. Плечистый, В.М. Ночвай

В основе диэлькометрического метода измерения влажности лежит зависимость величины диэлектрической проницаемости исследуемого материала  $\epsilon'$  от количества химически несвязанной воды. При подключении первичного преобразователя с материалом в цепь тока высокой частоты часть энергии электромагнитного поля идет на упругое смещение электрических зарядов и возвращается в электрическую цепь (действительная  $\epsilon'$  составляющая). Часть энергии электрического поля затрачивается на преодоление сил молекулярных полей при повороте диполей и нагревание диэлектрика за счет токов сквозной проводимости (мнимая  $\epsilon''$  составляющая). Эту часть относят к диэлектрическим потерям, которые характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \epsilon''/\epsilon'$ . Активные потери в исследуемом материале складываются из диэлектрических потерь и потерь проводимости, причем диэлектрические потери определяются совокупностью всех видов поляризации, имеющих место в материале. В работах [1] и [2] рекомендовано в качестве схемы замещения материала использовать в высокочастотном диапазоне (1-30 МГц) схему (рис. 1), где  $r$  – потери проводимости,  $r_э$ ,  $r_и$ ,  $r_p$  – соответственно диэлектрические потери, обусловленные электронной, ионной и релаксационной поляризацией,  $C_0$  – воздушная емкость первичного преобразователя, в котором находится материал,  $C_э$ ,  $C_и$ , и  $C_p$  – соответственно емкости, обусловленные электронной, ионной и релаксационной поляризацией.

Приведенная схема замещения иллюстрирует основные физические процессы в материале, но практического значения она не имеет, так как на данном этапе не представляется возможным осуществить расчет образующих ее элементов. Поэтому в практике используются только упрощенная схема замещения материала в виде простейшего эквивалентного двухполюсника с параллельным соединением образующих элементов [3].

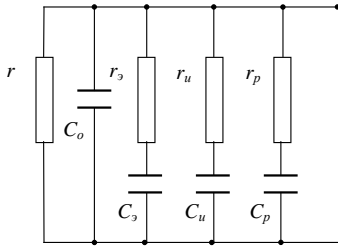


Рис. 1

Такой двухполосник и его векторная диаграмма приведены на рис. 2, где под  $C(W)$  понимается емкость первичного преобразователя с материалом, имеющим влажность  $W\%$ , и под  $r(W)$  – сопротивление, характеризующее все виды потерь в материале.

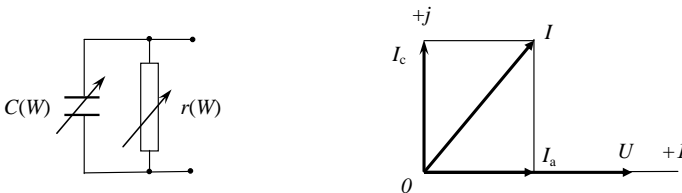


Рис. 2

Емкость и сопротивление показаны переменными, так как с изменением  $W\%$  их значения будут меняться.

В общем случае с позиций задач влагометрии выходным параметром первичного преобразователя с материалом при использовании приведенной на рис. 2 эквивалентной схемы является комплексное сопротивление:

$$Z(W) = \frac{r(W) - i \omega r(W) C(W)}{1 + \omega^2 r^2(W) C^2(W)}. \quad (1)$$

Как показано в работе [2], если  $[1/r(W)] \gg \omega C(W)$ , то в (1) преобладает активная составляющая сопротивления, при  $[1/r(W)] \leq \omega C(W)$  – емкостная. Однако полное разделение на практике этих двух составляющих не представляется возможным, поскольку контролируемые величины являются взаимосвязанными, сложным образом влияющие друг

на друга. Следовательно, при одной и той же влажности используемых материалов показания диэлькометрического влагомера будут зависеть также и от величины  $r(W)$ , т.е. от активных потерь исследуемых материалов. Эта неоднозначность обуславливает значительные погрешности измерений.

В данной статье предлагается метод устранения влияния активной составляющей проводимости исследуемого материала на результаты измерения. Структурная схема диэлькометрического влагомера [4], реализующая предлагаемый метод, приведена на рис. 3.

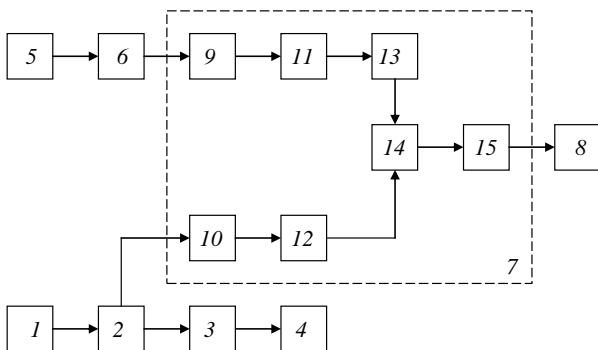


Рис. 3

Устройство содержит высокочастотный генератор 1, направленный ответвитель 2, длинную линию 3, емкостной первичный преобразователь 4, резистивный первичный преобразователь 5, управляемый преобразователь 6 нагрузки, аналоговое вычислительное устройство 7 и регистратор 8. Выход генератора 1 соединен с входом направленного ответвителя 2, основной выход которого соединен со вторым входом вычислительного устройства 7. Резистивный преобразователь 5 через управляемый преобразователь 6 нагрузки подключен к первому входу вычислительного устройства 7, к выходу которого подсоединен регистратор 8. К дополнительному входу направленного ответвителя 2 подключена длинная линия 3 с емкостным первичным преобразователем 4.

Аналоговое вычислительное устройство включает в себя два амплитудных детектора 9 и 10, два квадратора 11 и 12, инвертор 13, сумматор 14 и блок 15 степенного преобразования. Вход первого амплитудного детектора 9 является первым входом вычислительного устройства 7, который через последовательно соединенные амплитудный

детектор 9, квадратор 11 и инвертор 13 подсоединен к первому входу сумматора 14. Вход второго амплитудного детектора 10 является вторым входом вычислительного устройства 7 и через последовательно соединенные амплитудный детектор 10 и квадратор 12 подключен к второму входу сумматора 14. Выход сумматора 14 соединен с входом блока 15 степенного преобразования, выход которого является выходом вычислительного устройства 7. Блок 15 степенного преобразования производит возведение в степень с показателем 0,5.

Устройство работает следующим образом. Через емкостной первичный преобразователь 4 пропускается контролируемый материал. При этом изменяется величина емкости и активной проводимости емкостного первичного преобразователя 4, эквивалентная схема замещения которого для высокочастотного диапазона измерений влажности (1...30 МГц) может быть представлено как параллельное соединение конденсатора  $C(W)$  и резистора потерь  $r(W)$ . Вектор отраженного напряжения электромагнитного колебания генератора 1, возникающего на основном выходе направленного ответвителя 2, является функцией параметров частотного первичного преобразователя 4 и волнового сопротивления длинной линии 3 и может быть представлен в виде векторной суммы действительной и мнимой составляющих  $U_{отр} = U_a + jU_p$ , который в свою очередь, зависит соответственно от величин  $r(W)$  и  $C(W)$  емкостного первичного преобразователя (рис. 4).

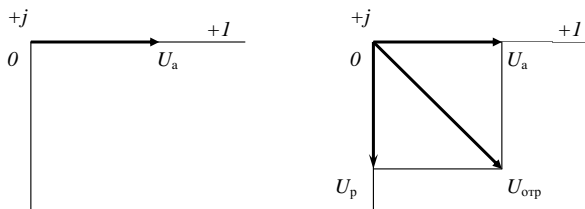


Рис. 4

Контролируемый материал пропускается также через резистивный первичный преобразователь 5, в результате чего на выходе управляемого преобразователя 6 нагрузки, представляющего собой низкочастотный мост переменного тока, появляется напряжение  $U'_a$ , соответствующее только лишь активным потерям исследуемого материала  $r(W)$ , т.е.  $U_a$ . Таким образом, на первый вход аналогового вычислительного устройства 7 поступает напряжение  $U'_a$ , а на второй вход – напряжение  $U_{отр}$ . В

результате детектирования на выходах блоков 9 и 10 появляются постоянные напряжения, пропорциональные соответственно модулям напряжений  $U_a$  и  $U_{отр}$ , которые поступают на входы соответственно первого 11 и второго 12 квадраторов.

После возведения в квадрат блоком 11 и инвентирования блоком 13 к первому входу сумматора 14 прикладывается напряжение  $-|U_a^2|$ , а ко второму входу сумматора прикладывается напряжение  $-|U_{отр}^2|$ . В результате суммирования на выходе блока 14 появляется напряжение, пропорциональное  $|U_{отр}^2| - |U_a^2|$ , которое поступает на вход блока 15 степенного преобразования. Выходное напряжение блока 15, пропорциональное  $\sqrt{|U_{отр}^2| - |U_a^2|}$  и соответствующее реактивной составляющей отраженного напряжения  $U_{отр}$ , т.е.  $U_p$ , поступает на вход регистратора 8. Следовательно, инвариантность к активным потерям обеспечивается введением в состав диэлькометрического влагомера вычислительного устройства и резистивного первичного преобразователя с управляемым преобразователем нагрузки. Последний выполняет функции масштабатора активной составляющей  $U_a'$ , которая пропорциональна активным потерям. Вычислительное устройство диалогового типа (7 блок) реализует в векторной форме операцию введения поправки на величину активных потерь.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Нетушил А. В. Высоочастотный нагрев в электрическом поле / А. В. Нетушил, Б. Я. Жуковицкий, В. Н. Кудин. – М. : Высш. шк., 1961. – 146 с.
2. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1965. – 488 с.
3. Кричевский Е. С. Теория и практика экспрессного контроля влажности жидких и твердых материалов / Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов [та ін.] ; за ред. Е. С. Кричевского. М. : Энергия, 1980. – 240 с.
4. А. с. 1520426 СССР, МПК G 01 N 27/02. Устройство для измерения влажности / А. Н. Коваль (СССР). – № 4308617/31-25 ; заявл. 21.09.87 ; опубл. 07.11.89, Бюл. № 41. – 2 с.



## **ВИПРОМІНЮВАННЯ ДВОФАЗНОГО СТРУМЕНЯ ТА ЙОГО ЗВ'ЯЗОК З ПАРАМЕТРАМИ НАПИЛЕННЯ**

В.В. Серов, В.М. Ночвай

Нанесення покриття газотермічними способами пов'язано з використанням двофазного струменя газ-тверді частинки як інструменту для нагріву та прискорення матеріалу покриття перед з'єднанням з поверхнею, що напилюють [1].

Не зважаючи на те, що найбільший вплив на якість покриття здійснюють процеси, які проходять в струмені, контроль та регулювання напилення переважно ведеться по витратним характеристикам на підході до пальникового пристрою, без зворотного зв'язку, що не забезпечує стабільності властивостей покриття.

Виходячи з цього, зроблена спроба вивчення можливостей контролю та регулювання процесу напилення безпосередньо по характеристикам струменя. Найбільш можливим технічно, враховуючи високу температуру і агресивність струменя, є безконтактний пірометричний спосіб контролю. Струмінь при газополуменевому напиленні покриття являє собою двофазний потік, який складається з високотемпературних продуктів згорання та розпечених твердих частинок матеріалу, що напилюють. Аналіз випромінювальних характеристик продуктів, які приймають участь в формуванні струменя, показав, що інтегральні характеристики випромінювання газової та твердої фази дають сумарний сигнал, який не дає можливості окремо оцінити випромінювання твердої фази, від температури якої залежить якість покриття. Одночасно, оцінюючи спектральні характеристики випромінювання, які показані на рис. 1, видно, що продукти горіння ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) мають спектр випромінювання в формі смуг, а тверді матеріали суцільний [2]. На рис. 1 видно, що в діапазоні довжин до 10 мкм є ділянки, на яких відсутнє випромінювання продуктів згорання і, відповідно, сигнал, вимірюваний на цих ділянках, буде характеризувати стан тільки твердої фази. З усіх смуг пропускання оптимальною є смуга з довжинами хвиль від 0 до 1,2 мкм, де інтенсивність випромінювання та отриманий сигнал максимальні.

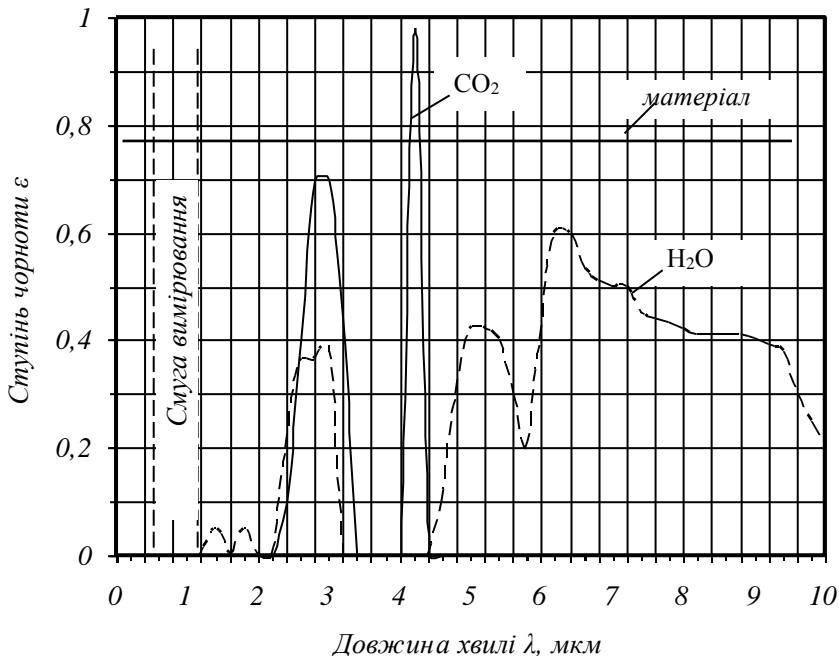


Рис. 1

Отримання покритть високої якості вимагають оптимального співвідношення між тепловою потужністю струменя, яка визначається витратами горючого газу та окислювача, і витратами матеріалу наплення, а також деякою дистанцією від зрізу палинкового пристрою до поверхні наплення. Була висунута гіпотеза, що це оптимальне співвідношення та дистанція можуть бути встановленими по максимуму потоку випромінювання частинок матеріалу наплення у вузькій спектральній області.

Для забезпечення міцності покритть частинки металу повинні мати температуру, при якій відбувається їх пластичне деформування та зчіплення з поверхнею наплення, а для економного використання енергоносія кількість поданого в струмінь металу повинно знаходитися у визначеному співвідношенні до теплової потужності струменя, для того, щоб при надлишкових витратах металу не відбувалось зниження

температури напилюваного матеріалу, а при недостатньому – спалювання палива без користі.

Виходячи з рівняння Планка, потік випромінювання з одиниці площі реальної поверхні в обмеженому інтервалі довжин хвиль описується наступним виразом

$$E_{a-b} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \varepsilon_{\lambda} \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda = \varepsilon_b \cdot (F_b - F_a) \cdot \sigma_0 \cdot T^4, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, м;

$\varepsilon_b$  – ступінь чорноти спектрального інтервалу від  $\lambda_a$  до  $\lambda_b$ ;

$c_1$  – постійний коефіцієнт ( $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16}$  Вт·м);

$c_2$  – постійний коефіцієнт ( $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К);

$T$  – температура, К;

$\sigma_0$  – постійна Больцмана;

$F_a$  і  $F_b$  – розрахункові величини, що залежать від множення  $\lambda_a T$ ,  $\lambda_b T$  та визначаються по таблицях [3].

Вважаючи поверхню частинки металу в двофазному потоці об'єктом одиничної площі, можна визначити потік випромінювання з ділянки струменя, як

$$E_{\Sigma} = \varepsilon_b (F_b - F_a) \sigma_0 T^4 n_{\text{ч}}; \quad (2)$$

$$E_{\Sigma} = \varepsilon_b (F_b - F_a) \sigma_0 T^4 f_{\text{ч}}, \quad (3)$$

де  $n_{\text{ч}}$  – число частинок на ділянці струменя;

$f_{\text{ч}}$  – сумарна площа частинок на ділянці струменя.

Так як число частинок або їх сумарна площа знаходиться в прямопропорційній залежності від ваги частинок, то збільшення потоку випромінювання буде визначатися збільшенням витрат матеріалу, який напилюють. Дане твердження буде справедливе, якщо забезпечена постійність довжини хвилі, ступеня чорноти і температури.

Контроль у вузькому спектральному діапазоні (рис. 1) забезпечує постійність довжин хвиль, спектральна ступінь чорноти металу не залежить від температури, зміна же температури частинок при русі в струмені, де відбувається складний теплообмін, невідворотна.

Крім того, температура частинок залежить від співвідношення їх кількості і теплової потужності струменя.

З рівняння 2, 3 видно, що значний вплив на потік випромінювання здійснює температура частинок та її зниження при збільшенні витрат частинок, вище оптимальних, повинно зразу викликати зменшення потоку випромінювання, що буде сигналом про надлишкових витратах матеріалу, що напилують.

Ця залежність була покладена в основу методики регулювання витрат матеріалу, що напилують, за потоком випромінювання. Дистанція напилування, яка завжди встановлюється по практичним даним, також може бути точно визначена за потоком випромінювання матеріалу, що напилують. З умов теплообміну в рухомому двофазному потоці впливає, що на деякій ділянці відбувається нагрівання частинок матеріалу, що напилують, та досягнення максимальної температури, а потім її падіння. Ділянка досягнення найбільшої температури буде характеризуватися максимальним потоком випромінювання, а відстань від сопла пального пристрою до цієї ділянки і буде оптимальною дистанцією наплення.

Експериментальна перевірка цих гіпотез проводилась на ацетиленокисневому пальнику для газополуменевого напилування покрить ГАЛ-6. Матеріал напилування – порошок нікелевого самофлюсуючого сплаву ПГ-12Н01. Витрати ацетилену та кисню контролювалися за допомогою ротаметрів і в процесі дослідів підтримувалися постійними. Витрати порошку визначалися ваговим методом.

Для вимірювання потоку випромінювання був виготовлений датчик, який оснащений приймачем випромінювання із смугою пропускання  $\lambda = 0,5 \dots 1,2$  мкм. Датчик оснащений діафрагмою, яка дозволяла візувати на приймач обмежений майданчик на поверхні струменя. Вимірювання проводилися мілівольтметром.

З графіків рис. 2 видно, що збільшення витрат матеріалу напилування приводить до зростання сигналу датчика і означає, що зміну витрат порошку можна проконтролювати по величині потоку випромінювання. Крім того, аналіз графіків показує, що величина сигналу по довжині струменя зростає до деякого рівня, а потім починає зменшуватися. При цьому максимальний сигнал із збільшенням витрат порошку знаходиться на більшому віддаленні від сопла пальника, а падіння сигналу відбувається більш стрімко.

$U, mB$

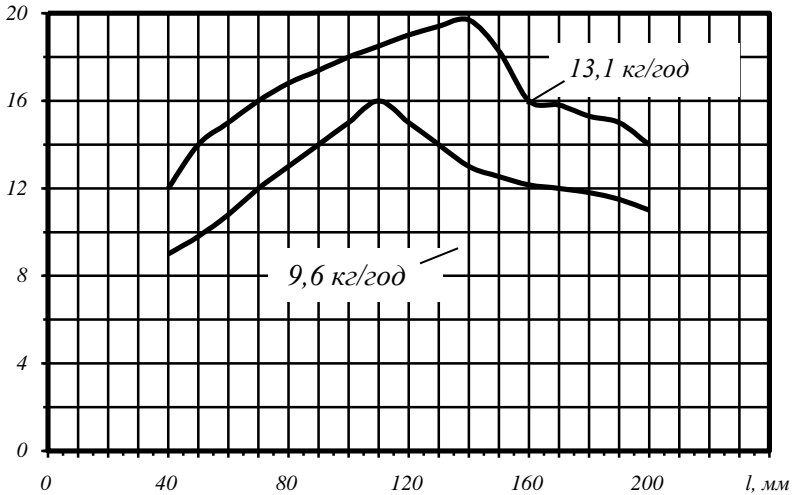


Рис. 2

Дані досліді показали принципову можливість контролю та регулювання параметрів напилування по величині потоку випромінювання.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Хасуи А. Наплавка и напыление [Текст] / А. Хасуи, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
2. Блох А. Г. Теплообмін в топках парових котлов [Текст] / А. Г. Блох. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
3. Гаррисон Т. Р. Радиационная пирометрия [Текст] / Т. Р. Гаррисон. – М. : Мир, 1964. – 248 с.

УДК 621.7.08: 531.733

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ ГАЗ-ТВЕРДІ ЧАСТИНКИ

В.М. Ночвай

*Визначено складові газового струменя апарата напилювання. Досліджено випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки. Визначено діапазон вимірювання потоку випромінювання твердих частинок.*

**Актуальність та постановка проблеми.** При виконанні контролю повноти згорання горючого газу та окислювача шляхом вимірювання потоку випромінювання полум'я пальника, необхідно вимірювати потік випромінювання твердих частинок сажового вуглецю. При визначенні екстремальних точок нерівномірного температурного поля двофазного потоку газ-тверді частинки, необхідно вимірювати потік випромінювання твердих частинок матеріалу напилювання. При цьому випромінювання газоподібних продуктів полум'я є перешкодою при вимірюванні потоку випромінювання твердих частинок.

Тому визначення газоподібних продуктів газового струменя апарата напилювання, дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки та визначення діапазону вимірювання потоку випромінювання твердих частинок є актуальною задачею.

**Мета досліджень.** Визначити діапазон вимірювання потоку випромінювання твердих частинок високотемпературного струменя газ-тверді частинки.

**Основна частина.** При газополуменевому напилюванні (ГПН) покриттів використовують струмись продуктів згорання суміші газів, які спалюються за допомогою пальника. Цей струмись є високотемпературним двофазним потоком газ-тверді частинки, який формується по схемі показаній на рис. 1.

При стехіометричному співвідношенні в горючій суміші кисню та горючого газу за межами ядра полум'я знаходяться продукти горіння:

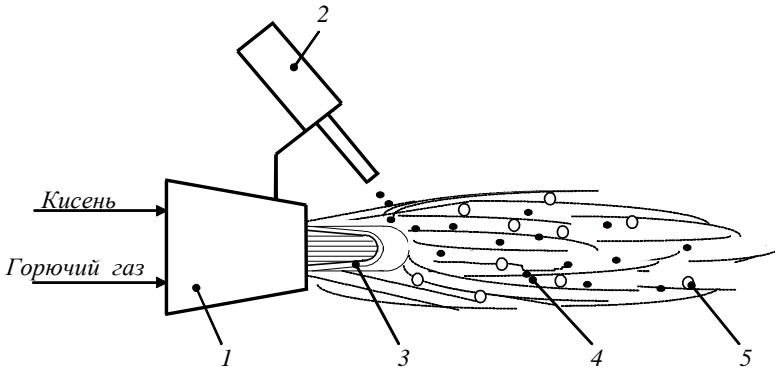
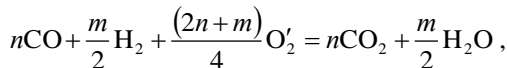
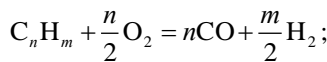


Рис. 1. Схема формування двофазного потоку апарата ГПН покриттів:  
 1 – апарат ГПН покриттів; 2 – порошковий дозатор; 3 – ядро полум'я;  
 4 – тверді тіла; 5 – молекули та атоми газоподібних продуктів

окис вуглецю, водень, вуглекислий газ та вода.

Кінцевими продуктами горіння є вуглекислий газ та вода. Реакція горіння проходить в дві стадії по схемі:



де  $C_n H_m$  – хімічна формула горючого газу;  $O_2$  – кисень горючої суміші;  $O'_2$  – кисень, що надходить з навколишнього повітря.

Крім того, балонні гази кисень та горючий газ мають домішки, які також входять до складу продуктів згорання пальної суміші. Вміст вологи в кисні 1-го, 2-го та 3-го сорту при 20 °С та 760 мм рт. ст. по ГОСТ 5583–68 може складати до 0,05 г/м<sup>3</sup> [1].

Крім того, незалежно від співвідношення в горючій суміші кисню та горючого газу, в полум'я пальника з навколишнього повітря надходить не тільки кисень, а також водяна пара та інші гази, які входять до складу повітря, а саме:  $O_2$ ;  $N_2$ ;  $Ar$ ;  $Ne$ ;  $Kr$ ;  $He$ ;  $Xe$ ;  $Rn$ ;  $CO_2$ ;  $H_2$  [2].

Випромінювання полум'я складається з наступних складових: власного випромінювання атомів та молекул в дискретних областях спектру; суцільного спектру власного випромінювання твердих частинок; розсіяного молекулами, атомами та твердими частинками випромінювання всіх частин полум'я.

Перша складова – газоподібні продукти, що утворюють полум'я. Газоподібні продукти, що утворюють полум'я, випромінюють селективно і енергія їх випромінювання зосереджена в більш-менш вузьких спектральних областях (смугах), якщо це триатомні, та взагалі не випромінюють енергію, якщо це двоатомні гази. Триатомні молекули вуглекислого газу та води є головним джерелом випромінювання продуктів згорання газоподібних палив [2, 3, 4].

Спектр випромінювання вуглекислого газу складається з чотирьох смуг з максимумами випромінювання, що відповідають довжинам електромагнітних хвиль 15, 4,3, 2,7 та 1,9 мкм [2, 3, 4] (рис. 2).

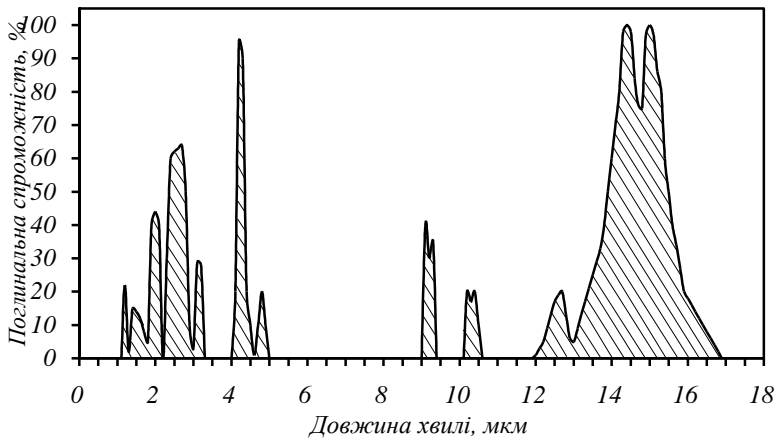


Рис. 2. Поглиняльна спроможність вуглекислого газу

Спектр випромінювання водяної пари складається зі смуг з максимумами випромінювання, що відповідають довжинам електромагнітних хвиль 1,38, 1,87, 2,7, 6,3 мкм та смуги випромінювання, що відповідає довжині хвилі 18...75 мкм [2, 3, 4] (рис. 3).

Друга складова – випромінювання частинок сажі та твердих частинок матеріалу напилування, які знаходяться в газовому струмені пальника.



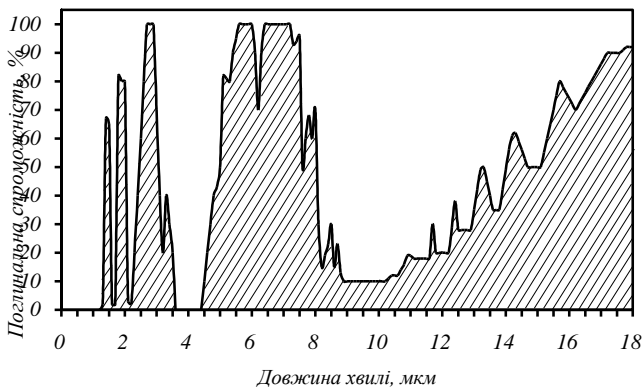


Рис. 3. Поглиняльна спроможність водяної пари

При недостатчі кисню в горючій суміші перша стадія реакції горіння проходить по схемі:



де  $k$  – кількість молекул кисню використаних в реакції горіння.

При цьому  $k < n/2$ , за межами ядра полум'я знаходяться продукти горіння CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O та тверді частинки сажового вуглецю, який не згорів внаслідок недостатчі необхідної кількості кисню.

Частинки сажі випромінюють як тверді тіла та мають суцільний спектр випромінювання з досить високим коефіцієнтом чорноти. Спектральна випромінювальна здатність вуглецю у твердому стані при  $\varepsilon_{0,65 \text{ мкм}}^{\text{с}} = 0,80 \dots 0,93$ . Сумарна випромінювальна здатність  $\varepsilon_{\text{т}}^{\text{с}}$  вуглецю при температурі: 25 °C – 0,81; 100 °C – 0,81; 500 °C – 0,79 [5]. Наявність в полум'ї частинок сажі викликає появу суцільного спектру випромінювання та призводить до виникнення загального світіння полум'я. Чим більша концентрація частинок сажі в полум'ї, тим більша інтенсивність його світіння і тим вище коефіцієнт чорноти полум'я.

Твердими частинками високотемпературного двофазного потоку газ-тверді частинки є частинки матеріалу напилювання: чисті метали, їх сплави та окиси [6, 7].

Метали, як і всі тверді матеріали мають суцільний спектр випромінювання, так як випромінюють енергію всіх довжин хвиль в

видимому та інфрачервоному діапазонах спектру. Коефіцієнт чорноти випромінювання твердих частинок матеріалу напилювання значно менше одиниці.

Третя складова – розсіювання випромінювання атомів та молекул. Розсіювання випромінювання атомів та молекул зосереджується в тих же дискретних областях спектру, в яких воно випромінювалось. Розсіювання випромінювання твердих частинок охоплює весь суцільний спектр і накладається на суцільний спектр власного випромінювання.

Таким чином, спектр випромінювання високотемпературного двофазного потоку газ-тверді частинки включає складові: спектр випромінювання газоподібних складових ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) та спектр випромінювання твердих частинок (рис. 4).

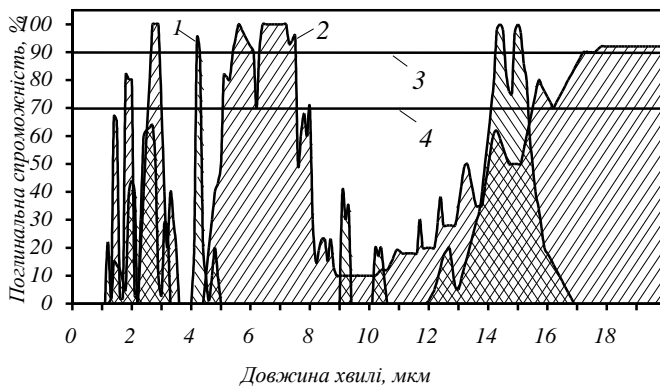


Рис. 4. Спектр випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки:  
1– вуглекислий газ; 2– водяна пара; 3– сажовий вуглець; 4 – матеріал напилювання

На осі абсцис зображено відрізок шкали електромагнітних хвиль, в якій входить частина оптичного діапазону електромагнітних коливань, а саме: видима область (довжина хвилі від 0,4 до 0,76 мкм); короткохвильова ділянка (довжина хвилі від 0,76 до 1,5 мкм) та середньохвильова ділянка (довжина хвилі від 1,5 до 18 мкм) інфрачервоної області.

В межах видимого та інфрачервоного спектрів випромінювання є ділянки («вікна» прозорості), де гази не випромінюють енергію, а саме: 0...1,1 мкм; 3,6...4,0 мкм (рис. 5).

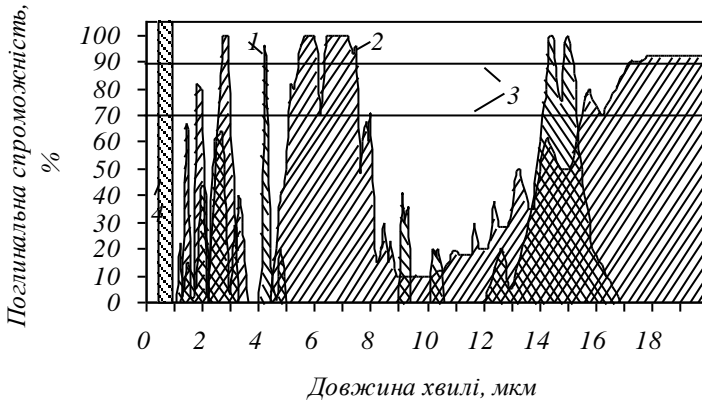


Рис. 5. Схема вибору діапазону вимірювання потоку випромінювання твердих частинок:

1 – вуглекислий газ; 2 – водяна пара; 3 – тверді частинки; 4 – смуга вимірювання потоку випромінювання твердих частинок

Задачу вибору діапазону електромагнітних хвиль для вимірювання потоку випромінювання твердих частинок вирішено шляхом вибору ділянки спектру електромагнітних хвиль між смугами випромінювання газів [8, 9]

Найбільш широка ділянка, де гази не випромінюють енергію знаходиться в області спектру електромагнітних коливань з довжиною хвилі від 0,5 до 1,1 мкм. В цю ділянку входить видима область (довжина хвилі від 0,4 до 0,76 мкм) та частина короткохвильової ділянки інфрачервоної області спектру (довжина хвилі від 0,76 до 1,1 мкм).

Діапазоном вимірювання потоку випромінювання твердих частинок вибрано ділянку («вікно» прозорості), яка знаходиться в області спектру електромагнітних коливань з довжиною хвилі від 0,5 до 1,1 мкм (рис. 5).

## Висновки

Головним джерелом випромінювання продуктів згорання газоподібних палив є молекули вуглекислого газу та води, енергія їх випромінювання зосереджена в спектральних смугах з максимумами випромінювання, що відповідають довжинам електромагнітних хвиль

1,38, 1,87, 1,9, 2,7, 4,3, 6,3, 15 мкм та смуги випромінювання, що відповідає довжині хвилі 18...75 мкм.

Випромінювання частинок сажі та частинок матеріалу напилювання, які знаходяться в високотемпературному двофазному потоці газ-тверді частинки, мають суцільний спектр випромінювання, так як випромінюють енергію всіх довжин хвиль в видимому та інфрачервоному діапазонах спектру.

Визначений діапазон вимірювання потоку випромінювання твердих частинок в області спектру електромагнітних коливань з довжиною хвилі від 0,5 до 1,1 мкм дає можливість застосовувати оптико-електронні прилади, в конструкцію яких не входять інтерференційні фільтри, так як в цій області спектру газу прозорі.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Нинбург А. К. Газопламенная обработка металлов с использованием газов-заменителей ацетилена / А. К. Нинбург. – М. : Машиностроение, 1976. – 152 с.

2. Казанцев Е. И. Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.

3. Оцисик М. Н. Сложный теплообмен / М. Н. Оцисик. – Пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук Н. А. Анфилова. – М. : Мир, 1976. – 616 с.

4. Блох А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А. Г. Блох. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1984. – 240 с.

5. Гаррисон Т. Р. Радиационная пирометрия / Т. Р. Гаррисон. – Пер. с англ. Е. Н. Антропова, А. П. Дронова и А. Г. Свиридова; Под ред. Д. Я. Света. – М. : Мир, 1964. – 246 с.

6. Борисов Ю. С. Порошки для газотермического напыления покрытий / Ю.С. Борисов.– К. : Общество «Знание» Украинской ССР, 1984. – 16 с.

7. Газотермическое напыление покрытий : сборник руководящих материалов. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. –176 с.

8. Пат. UA 75542 U Україна, МКІ GO1F 3/00. Спосіб визначення оптимальної дистанції напилювання покриттів / В. М. Ночвай, В.В. Серов, (Україна); №20041108891; Заявл. 01.11.2004; Опубл.17.04.2006; Бюл. №4.

9. Пат. UA 76332 U Україна, МКІ P23N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / В. М. Ночвай, В. В. Серов, (Україна); № 20041008025; Заявл. 04.10.2004. Опубл.17.07.2006. Бюл. №7.

*Опубліковано в матеріалах  
VI Міжн. наук.-прак. конф.,  
присвяч. 100-річчю з дня народж. акад. С.П. Корольова  
«Практична космонавтика і високі технології» 9-11 січня 2007 р.  
Житомир : ЖДТУ, 2007. – С. 95–96.*

УДК 621.7.08: 531.733

## **ВСТАНОВЛЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ НАПРУГОЮ НА ВИХОДІ ПРОМЕТРА ТА СВІТИМІСТЮ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ ГАЗ-ТВЕРДІ ЧАСТИНКИ**

В.М. Ночвай

**Постановка проблеми.** При виконанні контролю повноти згорання горючого газу шляхом вимірювання потоку випромінювання полум'я пального необхідно вимірювати потік випромінювання частинок сажевого вуглецю. При визначенні екстремальних точок нерівномірного температурного поля струменя газ-тверді частинки необхідно вимірювати потік випромінювання частинок матеріалу напилювання. Вимірювання потоку випромінювання твердих частинок виконують оптико-електронним приладом (ОЕП) в умовних одиницях або вольтях. Тому встановлення зв'язку між напругою на виході ОЕП та енергетичною світимістю твердих частинок є актуальною задачею.

**Мета досліджень.** Встановити зв'язок між напругою на виході ОЕП та енергетичною світимістю твердих частинок.

**Основна частина.** При вимірюванні потоку випромінювання струменя газ-тверді частинки випромінювачем є двофазний потік газ-тверді частинки. Звідси визначено метод роботи ОЕП – пасивний (рис. 1).

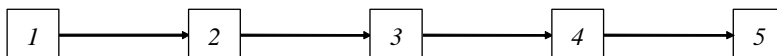


Рис. 1. Структурна схема ОЕП з пасивним методом роботи:  
1 – струмінь газ-тверді частинки; 2 – об'єкти; 3 – приймач  
випромінювання; 4 – підсилювач сигналу; 5 – вольтметр

Струмись газ-тверді частинки є лінійним випромінювачем, так як його розміри перевищують розміри майданчика візування. Фокусування енергії випромінювання в оптичній схемі ОЕП на чутливому елементі приймача випромінювання здійснюється за допомогою об'єктива.

Поле зору ОЕП визначено по схемі роботи оптичної системи при лінійному випромінювачі (рис. 2).

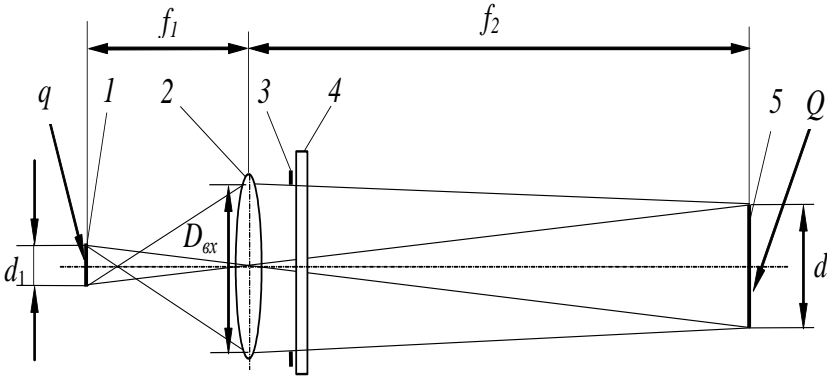


Рис. 2. Схема визначення поля зору ОЕП лінзового типу:

1 – майданчик чутливого елементу приймача; 2 – лінза; 3 – діафрагма;  
4 – світлофільтр; 5 – майданчик візування

В відповідності з теорією тонкої лінзи, яка знаходиться на відстані  $f_2$  від круглого об'єкта діаметром  $d_2$ , формує зображення цього об'єкта діаметром  $d_1$  на відстані  $f_1$  від лінзи. При цьому справедливі наступні співвідношення:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{f_2}{f_1}, \quad \frac{Q}{q} = \frac{f_2^2}{f_1^2}, \quad (1)$$

де  $Q$  – площа об'єкта (площа майданчика візування);

$q$  – площа зображення об'єкта.

З формули (1) визначено площу майданчика візування за виразом

$$Q = \frac{q \cdot f_2^2}{f_1^2}. \quad (2)$$

Потік  $\Phi_{\text{вх}}$  на вході ОЕП та опромінення  $E_{\text{евх}}$  окуляра визначено за формулами:

$$\Phi_{\text{вх}} = \frac{\tau_c L_e \pi D_{\text{вх}}^2 Q}{4 f_2^2} = \frac{\tau_c L_e S_{\text{вх}} Q}{f_2^2}; \quad E_{\text{евх}} = \frac{\tau_c L_e Q}{f_2^2}, \quad (3)$$

де  $\tau_c$  – коефіцієнт прозорості середовища між об'єктом та ОЕП;

$L_e$  – енергетична яскравість;  $S_{\text{вх}}$  – площа вхідного окуляра ОЕП;

$D_{\text{вх}}$  – діаметр приймальної системи ОЕП.

Після підстановки значення  $Q$  в формули (3) отримано

$$\Phi_{\text{вх}} = \frac{\tau_c L_e q S_{\text{вх}}}{f_1^2}; \quad E_{\text{евх}} = \frac{\tau_c L_e q}{f_1^2}. \quad (4)$$

При круглій формі вхідного окуляра отримано величину потоку на виході оптичної системи

$$\Phi'_{\text{вх}} = \tau_c \tau_o L_e q \pi \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2 f_1} \right)^2, \quad (5)$$

де  $\tau_o$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Форму основної частини газового струменя прийнято як циліндр діаметром  $D_c = 30$  мм. Майданчик візування є коло діаметром  $d_2 = 5$  мм і має опуклу поверхню радіусом  $R = D_c/2$ . Так як,  $d_2 \ll D_c$  то майданчик візування прийнято, як коло розміщене на площині.

З закону Ламберта витікає, що для рівнояскравого плоского випромінювача площею  $Q$ , між енергетичною яскравістю  $L_e$  і світимістю  $M_e$  існує залежність

$$M_e = \pi L_e. \quad (6)$$

Підставивши значення  $L_e$  в формулу (5) отримано величину потоку на виході оптичної системи

$$\Phi'_{\text{вх}} = \tau_c \tau_o \left( \frac{M_e}{\pi} \right) q \pi \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2f_1} \right)^2 = \tau_c \tau_o M_e q \cdot \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2f_1} \right)^2. \quad (7)$$

Енергетичну освітленість чутливого елемента площею  $q$  приймача випромінювання визначено за формулою

$$E = \tau_c \tau_o M_e \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2f_1} \right)^2. \quad (8)$$

Сигнальний струм фотодіода пропорційний освітленості  $E$  та інтегральній чутливості фотодіода  $S$ , звідси з урахуванням формули (8) встановлено зв'язок сигнального струму фотодіода з енергетичною світимістю твердих частинок двофазного потоку за формулою

$$I_{\phi} = ES = \tau_c \tau_o M_e \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2f_1} \right)^2 S. \quad (9)$$

Напругу на виході підсилювача визначено за формулою

$$U_{\text{вих}} = R_{\text{зз}} I_{\phi}, \quad (10)$$

де  $R_{\text{зз}}$  – опір резистора зворотного зв'язку підсилювача сигналу.

Підставивши значення  $I_{\phi}$  в формулу (10) встановлено зв'язок напруги на виході пірометра з енергетичною світимістю твердих частинок двофазного потоку за формулою

$$U_{\text{вих}} = \tau_c \tau_o M_e \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2f_1} \right)^2 S R_{\text{зз}}. \quad (11)$$

## Висновок

Напруга на виході пірометра знаходиться в прямопропорційній залежності з енергетичною світимістю твердих частинок двофазного потоку.



*Опубліковано в матеріалах  
7-го Міжнарод. наук.-техн. семінара  
«Современные проблемы подготовки производства,  
заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в  
промышленности и на транспорте». 20-22 лютого 2007 р.  
Київ : АТМ України, 2007. – С. 148–149.*

## **МЕТОД ЕКСПРЕС-ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ**

В.М. Ночвай

Одним із шляхів підвищення надійності та довговічності сучасних машин та обладнання є застосування захисних покриттів, отриманих методом газотермічного напилювання.

Якість газотермічних покриттів в значній мірі залежить від технологічних режимів їх напилювання. Пошук оптимальних параметрів нанесення покриттів традиційно виконують експериментальним, теоретичним та експериментально-теоретичним методами, які потребують матеріальних витрат і часу.

В роботі представлено нове розв'язання наукової задачі оптимізації параметрів газополуменевого напилювання покриттів, що базується на пошуку екстремуму функціональної залежності потоку випромінювання твердих частинок високотемпературного струменя газ-тверді частинки апарату напилювання від значення параметра оптимізації.

Вимірювання потоку випромінювання твердих частинок виконують пірометром в вузькому спектральному діапазоні електромагнітних хвиль між смугами випромінювання газоподібних продуктів згорання горючої суміші.

Пошук точки максимуму (мінімуму) потоку випромінювання твердих частинок в залежності від параметра оптимізації виконують кроковим методом.

Значення параметра, що оптимізують, змінюють в межах від  $l_i$  до  $l_n$  з кроком  $\Delta l$  з одночасним вимірюванням потоку випромінювання твердих частинок струменя газ-тверді частинки апарату напилювання, при цьому екстремальне значення потоку випромінювання  $\Phi_{max}$  ( $\Phi_{min}$ ) твердих частинок є відгуком оптимального значення  $l_{opt}$  параметра  $l$  технологічного процесу напилювання.

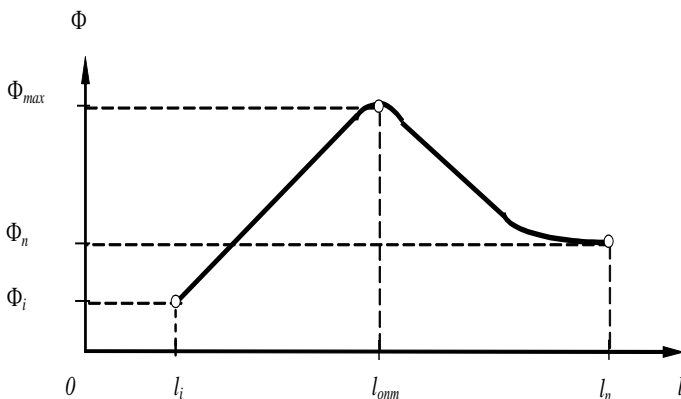


Рис. 1

Розроблений метод експрес-пошуку оптимальних параметрів газополуменевого напилювання покриттів є методом неруйнівного контролю, не використовує теоретичні розрахунки та функціональні залежності між параметрами технологічного процесу газополуменевого напилювання покриттів.

*Опубликовано в материалах 8-го Междунар. науч.-техн. семинара «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте». 26-28 лютого 2008 р. Киев : АТМ України, 2008. – С. 187–189.*

## **ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ**

В.М. Ночвай, В.Г. Петрук

Технологічний процес газополуменевого напилювання (ГПН) покриттів представлено величинами вхідних параметрів (дистанція напилювання  $l$ , витрати кисню  $V$ ) та величинами вихідних параметрів (напруга на виході пірометра  $U$ , потік випромінювання частинок

матеріалу напилювання або потік випромінювання частинок сажі при неповному згоранні горючого газу) [1].

Метод контролю оптимальних параметрів ГПН покриттів має ряд технологічних особливостей. Пошук та контроль оптимального значення параметра ГПН покриттів виконують як при наявності, так і при відсутності характеристичного рівняння моделі об'єкта дослідження.

Пошук оптимальної дистанції ГПН покриттів зводиться до пошуку точки екстремуму вихідного параметра з наступним визначенням значення оптимальної дистанції в точці екстремуму. Пошук точки екстремуму вихідного параметра виконують кроковим методом [2] (рис. 1). При виконанні контролю оптимальної дистанції ГПН заданим значенням є значення максимуму потоку випромінювання твердих частинок.

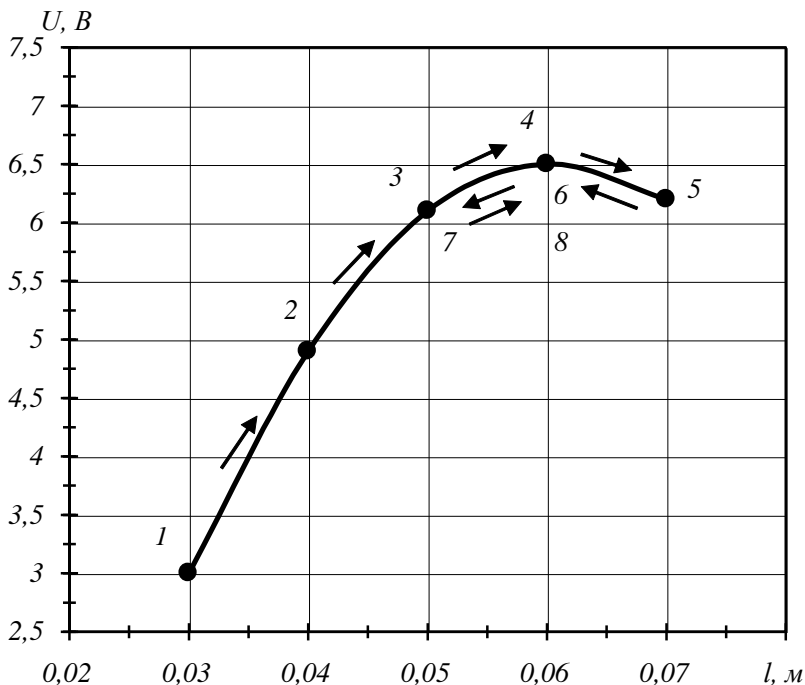


Рис. 1. Пошук екстремуму вихідного параметра:  
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – номер кроку пошуку

Операції пошуку та контролю оптимальних значень параметрів ГПН покриттів прості і не потребують високого рівня кваліфікації оператора. При пошуку точки екстремуму вихідного параметра виконують наступні операції:

- а) довільний вибір початкової точки  $x_i$  пошуку екстремуму;
- б) довільний вибір початкового напрямку руху робочої точки по характеристиці об'єкта;
- в) вимірювання значення вихідного параметра  $U_i$   $i$  – того кроку пошуку;
- г) розрахунок різниці значення вихідного параметра  $i$  - того та  $(i - 1)$  – го кроків пошуку екстремуму ( $\Delta U_i = U_i - U_{(i-1)}$ );
- д) вибір напрямку руху робочої точки по характеристиці об'єкта: якщо  $\Delta U_i > 0$ , то в сторону збільшення значення вхідного параметра  $x$  на крок  $h$ ; якщо  $\Delta U_i < 0$ , то в сторону зменшення значення вхідного параметра  $x$  на крок  $h$ .

Пошук значення витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в горючій суміші пального, виконують при незмінних витратах горючого газу, витрати кисню збільшують з кроком  $h$  і визначають значення витрат кисню за спадом до нуля потоку випромінювання сажового вуглецю за межами ядра полум'я (рис. 2).

При виконанні контролю витрат кисню заданим значенням є значення потоку випромінювання частинок сажового вуглецю, яке дорівнює нулю.

Пошук та контроль витрат кисню можна виконувати при використанні будь-якого типу горючого газу, молекула якого вміщує атом вуглецю.

Для отримання відновлювального або окислювального типу полум'я пошук витрат кисню виконують спочатку для нормального типу полум'я, а потім на 5...10% витрати кисню для отримання відновлювального типу полум'я зменшують, для отримання окислювального – збільшують (рис. 2).

Так як метою пошуку є визначення значення вхідного параметра в точці максимуму (мінімуму) потоку випромінювання твердих частинок струменя, то значення потоку випромінювання твердих частинок достатньо вимірювати в умовних одиницях.

Пошук оптимальних значень параметрів виконують послідовно по одному параметру. Спочатку виконують пошук витрат кисню, потім виконують пошук оптимальної дистанції напилювання покриттів.

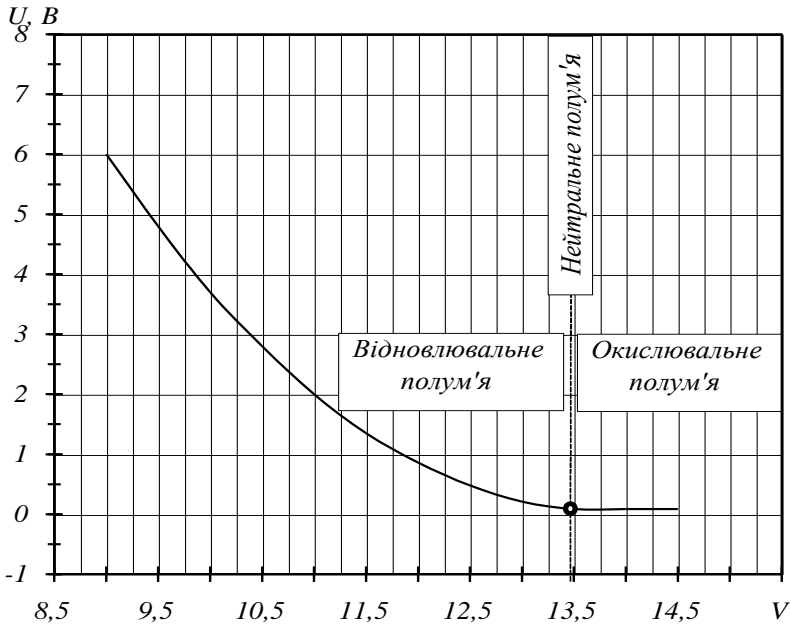


Рис. 2. Схема встановлення типу полум'я пальника (витрати  $C_2H_2$  11,5 л/хв)

Одновременный поиск витрат кислорода та оптимальної дистанції напыливания невозможливий, так як в цьому випадку потік випромінювання твердих частинок струменя являє собою суму потоків випромінювання частинок матеріалу напыливания та частинок сажі і визначити значення кожної складової із загальної суми неможливо.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ночвай В. М. Метод експрес-пошуку оптимальних параметрів газополуменевого напыливания покриттів / В. М. Ночвай // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте. Материалы 7-го Междун. науч.-техн. семинара, 20-22 февраля 2007г., г. Свалява. – К. : АТМ України, 2007. – С 148–149.

2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.

УДК 621.7.08: 531.733

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК

В.М. Ночвай, В.Г. Петрук

*В роботі виконано аналіз та розрахунок систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок, які знаходяться в струмені газового пальника.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з науковими завданнями.** Серед існуючих методів нанесення захисних покриттів важливе місце займає метод газополуменевого напилювання покриттів. Якість напилених покриттів в значній мірі залежить від оптимальних параметрів їх напилювання, в тому числі від стехіометричного співвідношення витрат кисню та горючого газу в пальній суміші пальника. Крім того, результати вимірювання необхідно представляти в формі відповідно з стандартом МИ 1317-86.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми.** В роботі [1] вирішено задачу контролю з регулюванням витрат кисню пальника по потоку випромінювання частинок сажового вуглецю. Випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки досліджено в роботі [2], а в роботі [3] встановлено зв'язок між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Таким чином, не виявлено фактори, які впливають на параметри потоку випромінювання твердих частинок. Відповідно не визначено методичні похибки вимірювання потоку випромінювання твердих частинок, які знаходяться в високотемпературному газовому струмені.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є: виявлення факторів, які впливають на параметри потоку випромінювання твердих частинок; дослідження та розрахунок значення складових та сумарної систематичної похибки вимірювання потоку випромінювання твердих частинок; її

оцінку середнього квадратичного відхилення; інтервалів, в яких з заданою ймовірністю знаходяться значення систематичних похибок.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** При виконанні досліджень використано пальник моделі ГАЛ-6-73, а для живлення пальника використано кисень та ацетилен в складі яких є тверді домішки. В полум'я з робочої зони надходить повітря в складі якого є металева пилюка та сажа (рис. 1).

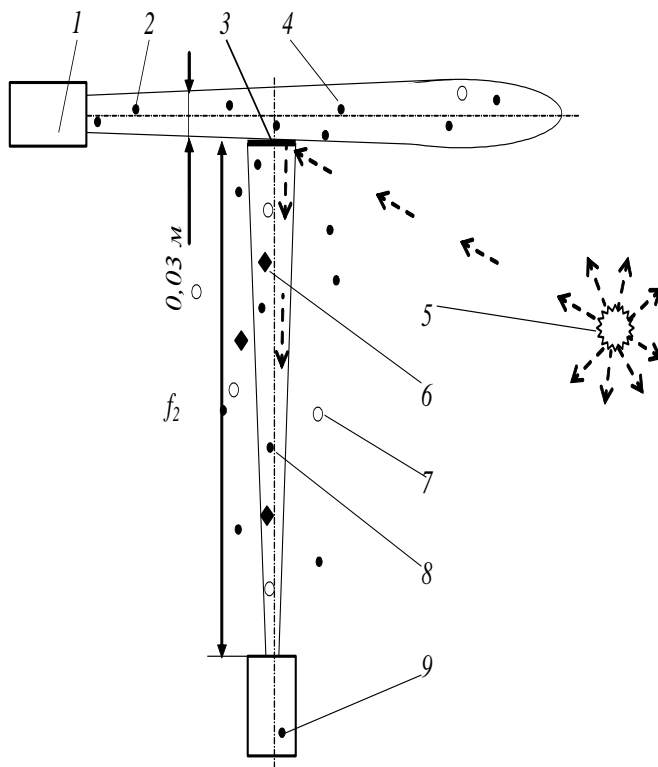


Рис. 1. Схема вимірювання потоку випромінювання твердих частинок:  
1 – пальник; 2 – струмінь газ-тверді частинки; 3 – майданчик візування;  
4 – тверді домішки балонних газів; 5 – стороннє джерело  
випромінювання; 6 – сажа; 7 – крапельки води; 8 – металева пилюка;  
9 – пірометр

Потік випромінювання твердих домішок накладається на потік випромінювання сажового вуглецю при неповному згоранні палива, випромінювальна здатність якого менше одиниці. Між струменем газ-тверді частинки та пірометром знаходиться середовище – шар повітря товщиною 0,3 м, що поглинає потік випромінювання твердих частинок. В повітрі робочої зони знаходяться частинки металевого порошку, сажі та води. При вимірюванні потоку випромінювання частинок (діапазон електромагнітних хвиль  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м) присутнє стороннє джерело випромінювання – світильник штучного освітлення.

Таким чином, на параметри потоку випромінювання твердих частинок впливають наступні фактори: поглинання випромінювання середовищем  $\tau_c$ , яке знаходиться між твердими частинками та пірометром; випромінювання твердих домішок, що надходять в полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони  $\Phi_T$ ; відбите твердими частинками випромінювання стороннього джерела  $\Phi_c$ . Відповідно систематичні похибки можуть бути наступних типів:  $\delta_\tau$ ,  $\delta_T$  та  $\delta_c$ .

Між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок встановлено зв'язок, який описано функцією

$$U_{\text{вих}} = k_1 \tau_c M_e = k_1 \tau_c \varepsilon_1 \sigma T^4, \quad (1)$$

де  $U_{\text{вих}}$  – напруга на виході пірометра;  $k_1$  – коефіцієнт, який визначається параметрами пірометра;  $\tau_c$  – коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем;  $M_e$  – світимість частинок;  $\varepsilon_1$  – коефіцієнт випромінювання частинок;  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup> – постійна Стефана-Больцмана;  $T$  – температура частинок, К [3].

Тоді виходячи з виду функції (1) формула для відносної похибки результату вимірювання має вид:

$$\delta_U = \delta_\tau + \delta_T + \delta_c,$$

де  $\delta_U$  – сумарна похибка вимірювання потоку випромінювання частинок сажі;  $\delta_\tau$  – похибка, яка породжена поглинанням випромінювання середовищем  $\tau_c$ ;  $\delta_T$  – похибка, яка породжена випромінюванням твердих домішок, що надходять в полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони;  $\delta_c$  – похибка, яка породжена випромінюванням стороннього джерела [4].

Похибку  $\delta_\tau$  визначено за виразом:



$$\delta_{\tau} = \frac{v_{\lambda} - v_o}{v_o} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

де  $v_{\lambda}$  – спектральний коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем;  $v_o$  – коефіцієнт пропускання випромінювання в вакуумі. Спектральний коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем визначено на основі закону Бугера-Бера за формулою:

$$v_{\lambda} = \exp(-k_{\lambda}L), \quad (3)$$

де  $k_{\lambda}$  – спектральний показник поглинання випромінювання;  $L$  – товщина поглинального шару [5, 6].

Найбільш ймовірний розмір крапель води  $3 \cdot 10^{-6} \dots 10 \cdot 10^{-6}$  м [5], а розмір частинок пилюки до  $10 \cdot 10^{-6}$  м [7]. Прийнято граничні значення: розмір частинок води та пилюки  $10 \cdot 10^{-6}$  м; довжина хвилі  $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$  м;  $L = f_2 = 0,3$  м. Тоді параметр дифракції дорівнює

$$\rho = \frac{\pi D}{\lambda}, \quad (4)$$

де  $D$  – діаметр частинок води, пилюки,  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання [5, 6, 8]. Так як  $\rho = 62,8 \gg 1$ , то відповідно з теорією Мі частинки води та пилюки є частинками великих розмірів [8] і  $k_{\lambda}$  такого середовища визначено за формулою:

$$k_{\lambda} = \frac{\mu}{\gamma} k(r_o), \quad (5)$$

де  $\mu$ ,  $\gamma$  – концентрація та густина поглинаючих частинок відповідно;  $k(r_o)$  – функція, яка визначається оптичними розмірами частинок [5].

Оптичний розмір частинок визначено графічним методом. Для  $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$  м та  $r_{\text{ч}} = 10 \cdot 10^{-6}$  м значення  $r_o/r_{\text{ч}} = 1,1$  (рис. 2),  $r_o = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1 = 11 \cdot 10^{-6}$  м. Значення функції  $k_{\lambda}(\mu/\gamma)^{-1} \cdot 10^{-6}$  дорівнює 0,18 (рис. 3).

Тоді формула (5) приймає вид:

$$k_{\lambda} = \frac{\mu}{\gamma} \cdot 10^6 \cdot 0,18. \quad (6)$$

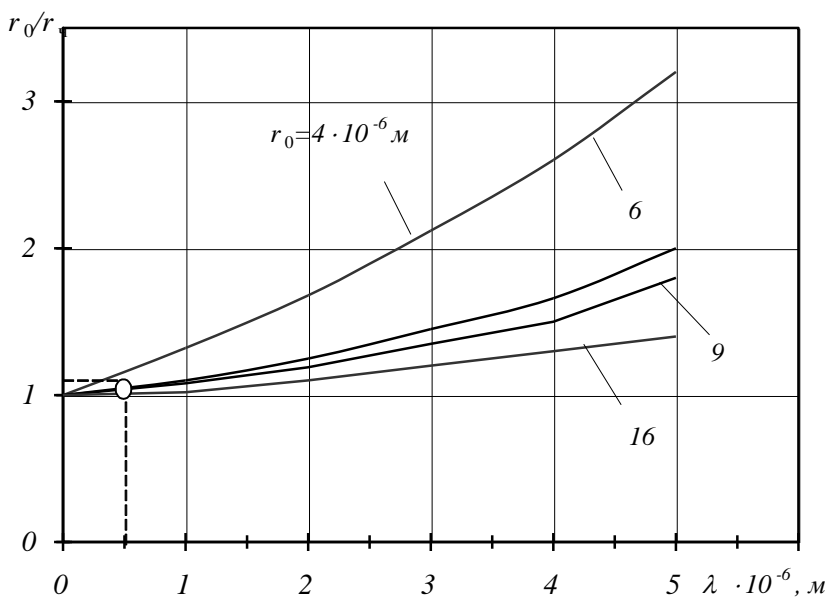


Рис. 2. Залежність  $r_0/r_ч$  від довжини хвилі і розмірів частинок [5]

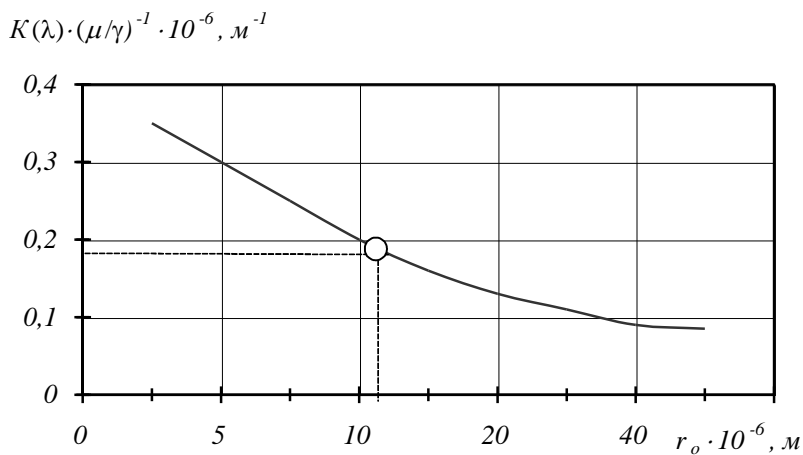


Рис. 3. Залежність  $k_\lambda$  від оптичних розмірів частинок [5]

В розрахунках прийнято значення гранично допустимої концентрації в повітрі робочої зони для сажі  $4 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> [9] та металевої пилюки –  $2 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> (табл. 1).

Таблиця 1

**Значення параметрів поглинаючих частинок, що знаходяться в шарі повітря**

Поглинаючі частинки	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , кг/м <sup>3</sup>	$K_\lambda$ , м <sup>-1</sup>
Вода	1000	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$
Металева пилюка	8310	$2 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Сажа	165	$4 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$

Тоді відповідно за формулами (3) та (2) отримано:  $\nu_\tau=0,997$ , а похибка  $\delta_\tau=0,3$  %.

Похибку  $\delta_\tau$ , яка породжена випромінюванням твердих домішок, що надходять в полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони, визначено за формулою:

$$\delta_\tau = \frac{\varepsilon_\tau - \varepsilon_0}{\varepsilon} \cdot 100 \%,$$

де  $\varepsilon_\tau$  – ступінь чорноти полум'я з твердими домішками;  $\varepsilon_0 = 0$  – ступінь чорноти полум'я без твердих домішок;  $\varepsilon$  – повна випромінювальна здатність металевої пилюки. Ступінь чорноти полум'я пальника  $\varepsilon_\tau$  при повному згоранні пальної суміші визначено за виразом:

$$\varepsilon_\tau = 1 - \exp(-\tau),$$

де  $\tau = \tau_\tau + \tau_a$  – оптична товщина полум'я, яка складається з оптичних товщин газів  $\tau_\tau$  та твердої дисперсної фази (твердих домішок) полум'я  $\tau_a$  [8], а так як в інтервалі довжин хвиль  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м гази прозорі [2], то  $\tau_\tau = 0$ , а оптичну товщину полум'я, в якому є тверді домішки, визначено за виразом [8]:  $\tau = \tau_a = k_\lambda \cdot L$ . Так як для прийнятих значень  $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$  м та  $r_\tau = 10 \cdot 10^{-6}$  м параметр дифракції  $\rho = 62,8$  (див. формулу (4), то спектральні показники поглинання частинками пилюки, металевої пилюки та сажі визначено за формулою (6). Значенням концентрації

твердих домішок в повітрі, що надходить в полум'я, прийнято значення гранично допустимої концентрації в повітрі робочої зони для сажі  $4 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup> [9], а для металевої пилюки прийнято  $2 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>. В стиснутих газах вміст смоли та пилюки може бути до  $1 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup> та в перерахунку на *НСН* до  $0,05 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> ціанієвих сполук [10].

Поглиналим шаром є високотемпературний струмінь газ-тверді частинки товщиною 0,03 м. Оптичні товщини полум'я  $\tau_{\text{п}}$ ,  $\tau_{\text{м}}$  та  $\tau_{\text{с}}$  визначено відповідно за виразами:

$$\tau_{\text{п}} = k_{\lambda\text{п}} L ; \tau_{\text{м}} = k_{\lambda\text{м}} L ; \tau_{\text{с}} = k_{\lambda\text{с}} L ,$$

де  $\tau_{\text{п}}$ ,  $\tau_{\text{м}}$ ,  $\tau_{\text{с}}$  – оптичні товщини полум'я відповідно з частинками пилюки, металевої пилюки та сажі;  $k_{\lambda\text{п}}$ ,  $k_{\lambda\text{м}}$ ,  $k_{\lambda\text{с}}$  – спектральні показники поглинання випромінювання відповідно частинками пилюки, металевої пилюки та сажі (табл. 2).

Таблиця 2

**Значення параметрів поглинаючих частинок та оптичних товщин полум'я**

Поглинаючі частинки	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , кг/м <sup>3</sup>	$k_{\lambda}$ , м <sup>-1</sup>	$\tau$
Пилюка	1500	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$14,4 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Металева пилюка	8310	$2 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$
Сажа	165	$4 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$

Оптичну товщину полум'я, в якому є частинки пилюки, металевої пилюки та сажі, визначено за виразом  $\tau = \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{м}} + \tau_{\text{с}}$  і дорівнює  $6,9 \cdot 10^{-4}$ . Тоді ступінь чорноти полум'я  $\varepsilon_{\text{т}} = 6,9 \cdot 10^{-4}$  і для граничного значення температури твердих домішок  $T = 3173$  К значення похибки  $\delta_{\text{т}} = 0,0813$  %. Похибку  $\delta_{\text{с}}$ , яка породжена випромінюванням стороннього джерела, визначено за формулою:

$$\delta_{\text{с}} = \frac{\varepsilon_{\text{екв}} - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot 100 \%,$$

де  $\varepsilon_{\text{екв}}$ ,  $\varepsilon$  – еквівалентна та власна випромінювальна здатність об'єкта вимірювання.

З метою визначення еквівалентної випромінювальної здатності об'єкта спочатку визначено сумарну енергетичну яскравість об'єкта випромінювання за виразом:

$$L_c = L_{об} + L_{від} = \varepsilon L_{об}^o + (1 - \varepsilon) \eta_1 \eta_2 L_{ст} = L_{об}^o \left[ \varepsilon + (1 - \varepsilon) \eta_1 \eta_2 \left( \frac{L_{ст}}{L_{об}^o} \right) \right],$$

де  $L_c$  – сумарна енергетична яскравість об'єкта випромінювання;  $L_{об}$  – власна енергетична яскравість об'єкта випромінювання;  $L_{від}$  – енергетична яскравість об'єкта випромінювання від стороннього джерела випромінювання;  $L_{об}^o$  – яскравість абсолютно чорного тіла (АЧТ);  $\eta_1$  – коефіцієнт, який характеризує взаємне розміщення об'єкта та джерела оптичної перешкоди;  $\eta_2$  – коефіцієнт, який характеризує вид обробки поверхні об'єкта;  $L_{ст}$  – енергетична яскравість стороннього джерела [5]. Звідси визначено

$$\varepsilon_{екв} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \eta_1 \eta_2 \left( \frac{L_{ст}}{L_{об}^o} \right). \quad (7)$$

Коефіцієнти  $\eta_1$  та  $\eta_2$  визначено відповідно за формулами:

$$\eta_1 = \cos \alpha_{ст} \cdot \frac{\Omega}{\pi}; \quad \eta_2 = \frac{1}{\pi},$$

де  $\alpha_{ст}$  – кут падіння променів від стороннього джерела;  $\Omega$  – тілесний кут, під яким видно стороннє джерело випромінювання [5], який визначено за формулою:

$$\Omega = \frac{A_{сф}}{r_{сф}^2},$$

де  $A_{сф}$  – площа сферичної поверхні, яка знаходиться всередині конуса тілесного кута з вершиною в центрі сфери;  $r_{сф}$  – радіус сфери [11].  
Прийнято:  $A_{сф} = Q = 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ;  $\alpha_{ст} = 50^\circ$ ,  $r_{сф} = f_2 = 0,3 \text{ м}$ .  
Тоді  $\eta_1 = 6,7 \cdot 10^{-5}$ ,  $\eta_2 = 0,318$ .

Для невеликого тілесного кута випромінювання стороннього джерела енергетичну яскравість цього джерела визначено за виразом:

$$L_{\text{ст}} = \frac{E_e}{\Omega}, \quad (8)$$

де  $E_e$  – енергетична освітленість майданчика візування [11].

Освітленість майданчика візування дорівнює освітленості приміщення – 450 лк. З метою переходу від світлових одиниць до енергетичних використано формули:

$$\Phi_v = \int_0^{\infty} s_{\lambda} \Phi_{e\lambda} d\lambda; S_{\lambda} = S(\lambda) = \frac{S_{\lambda}}{S_{\lambda m}}, \quad (9)$$

де  $\Phi_v$  – світловий потік;  $\Phi_{e\lambda}$  – потік випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$ ;  $s_{\lambda}$  – спектральна світлова ефективність;  $S_{\lambda}$  – відносна спектральна чутливість приймача випромінювання;  $s_{\lambda m} = 683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$  – світловий еквівалент променевого потоку. Тоді після заміни величин потоків величинами освітленості в формулі (9) отримано:

$$E_v = 683 \cdot \int_0^{\infty} S_{\lambda} E_{e\lambda} d\lambda, \quad (10)$$

де  $E_v$  – освітленість майданчика візування.

Так як для довжини хвилі  $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  значення  $s_{\lambda}$  дорівнює 0,1 (рис. 4), а  $S(\lambda) = 0,1 / 1 = 0,1$ , то формули (10) та (8) відповідно приймають вид:

$$E_v = 683 \cdot 0,1 \cdot E_e = 68,3 \cdot E_e; L_{\text{ст}} = E_v / 68,3 \cdot \Omega.$$

Значення енергетичної яскравості та світимості АЧТ визначено за формулами:

$$L_{e\lambda} = M_{e\lambda} / \pi; M_{e\lambda} = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]^{-1},$$

де  $L_{e\lambda}$  – енергетична яскравість АЧТ;  $M_{e\lambda}$  – енергетична світимість АЧТ;  $C_1, C_2$  – постійні Планка [11].

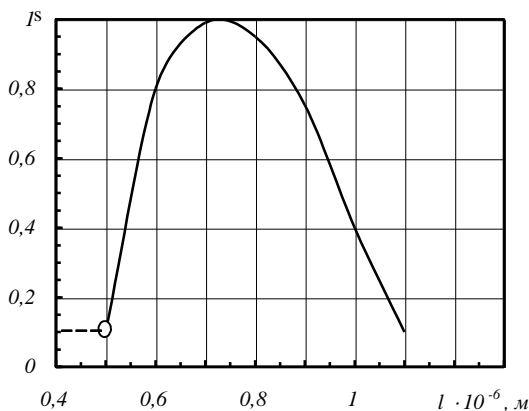


Рис.4. Спектральна характеристика кремнієвого фотодіода [12]

Після підстановки значення  $\varepsilon = 0,85$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $L_{ст}$  та  $L^{об} = L_{ελ}$  в формулу (7) отримано:  $\varepsilon_{екв} = 0,85000000000022$ . Тоді  $\delta_c = 2,59 \cdot 10^{-11} \%$ .

Сумарна систематична похибка вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю складається з трьох складових:  $\delta_\tau = -0,3 \%$ ,  $\delta_\tau = 0,0813 \%$  та  $\delta_c = 2,59 \cdot 10^{-11} \%$ . Так як похибка  $\delta_c$  в 3137581844 разів менша похибки  $\delta_\tau$ , то похибкою  $\delta_c$  можна знехтувати і опустити з подальшого розгляду. Похибки  $\delta_\tau$  та  $\delta_\tau$  незалежні, закон розподілу похибок – рівномірний. Тоді похибки  $\delta_\tau$  та  $\delta_\tau$  прийнято половинами ширини рівномірного розподілу і визначено середнє квадратичне відхилення як

$$\sigma_\tau = \delta_\tau / \sqrt{3}; \quad \sigma_\tau = \delta_\tau / \sqrt{3},$$

де  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_\tau$  – середнє квадратичне відхилення похибок  $\delta_\tau$  та  $\delta_\tau$  [4] і в результаті розрахунків отримано:  $\sigma_\tau = 0,1732 \%$ ;  $\sigma_\tau = 0,0469 \%$ .

Тоді суму  $\sigma_\tau$  та  $\sigma_\tau$  визначено за формулою

$$\sigma = \sqrt{\sigma_\tau^2 + \sigma_\tau^2},$$

де  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення сумарної похибки [4], і дорівнює 0,1794 %.

Вагу дисперсії першої складової  $p$  в загальній дисперсії, ексцес  $\varepsilon_p$ , контрексцес  $\chi$  та ентропійний коефіцієнт композиції двох рівномірних законів розподілу похибок  $k$  визначено відповідно за формулами:

$$p = \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2}; \varepsilon_p = \varepsilon_1 p^2 + 6p(1-p) + \varepsilon_2(1-p)^2; \chi = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_p}}; k = \sqrt{\frac{3 \cdot e^C}{(1+C^2)}},$$

де  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_p$  – ексцес першої, другої складових та сумарної похибки,  $C = \sigma_r/\sigma_c$  [4] і отримано:  $p = 0,068$ ;  $\varepsilon_p = 1,95$ ;  $\chi = 0,716$ ;  $k = 1,46$ .

Довірче значення похибки і границі довірчого інтервалу визначено за формулами:

$$\delta_d = t\sigma; \delta = \pm t\sigma; t = 1,62 \left[ 3,8 \cdot (\varepsilon_p - 1,6) \right]^{2/3} \lg \left[ \frac{1}{(1-p)} \right],$$

де  $\delta_d$  – довірче значення похибки;

$t$  – множник, який залежить від значення довірчої ймовірності  $P$ ;

$\delta$  – границі довірчого інтервалу при заданому значенні довірчої ймовірності  $P = 0,95$  [4] і отримано:  $t = 1,74$ ;  $\delta_d = 0,312\%$ ;  $\delta = \pm 0,312\%$ .

## Висновки

Сумарна систематична похибка вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю складається з трьох складових  $\delta_r$ ,  $\delta_T$  та  $\delta_c$  і суттєво залежить від поглинання випромінювання середовищем та випромінювання твердих домішок, що надходять в полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони.

Так як відомо значення та знак сумарної систематичної похибки, то вона може бути видалена шляхом введення поправки.

## Перспективи подальших розвідок у даному напрямку

Дослідження сумарних похибок вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю при контролі витрат кисню пальника і обчислити оцінку достовірності результатів вимірювального контролю витрат кисню.



## ЛІТЕРАТУРА:

1. Пат. UA 76332 U Україна, МКІ Р23N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / Ночвай В. М., Серов В. В. (Україна); Заявл. 04.10.2004. Опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7.

2. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць ЖДТУ. – 2006. – № 4. – С. 69-76.

3. Ночвай В. М. Встановлення зв'язку між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Практична космонавтика і високі технології», присвяченої 100-річчю з дня народження академіка С. П. Корольова. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – С. 95–96.

4. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

5. Поскачей А. А. Оптико-электронные измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.

6. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю): монографія / В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 207 с.

7. Духанин Ю. А. Техника безопасности и противопожарная техника в машиностроении [Текст] / Ю. А. Духанин, Д. Ф. Акулин. – М. : Машиностроение, 1973. – 304 с.

8. Блох А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов [Текст] / А. Г. Блох. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

9. Белов С.В. Безопасность производственных процессов: справочник / С. В. Белов, В. Н. Бринза, Б. С. Векшин; под общ. ред. С. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 448 с.

10. Казанцев Е.И. Промышленные печи: справ. руководство для расчетов и проектирования [Текст] / Е. И. Казанцев. – М. : Metallургия, 1975. – 368 с.

11. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения [Текст] / Ю. Г. Якушенков. – М. : Сов. радио, 1977. – 272 с.

12. Справочник по приёмникам оптического излучения / В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов и др. – К. : Техніка, 1985. – 216 с.

УДК 621.7.08: 531.733

## МЕТОД КОНТРОЛЮ ВИТРАТ КИСНЮ ПАЛЬНИКІВ ПО ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОЛУМ'Я

В.М. Ночвай

*В роботі виконано аналіз методів контролю витрат кисню та горючого газу в пальній суміші пальника. Розроблено та досліджено метод контролю витрат кисню по потоку випромінювання полум'я. Досліджено похибки методу контролю витрат кисню.*

**Актуальність та постановка проблеми.** Для якісного проведення технологічних процесів газового зварювання, газополуменевого напилювання необхідно підтримувати певне співвідношення кисню та горючого газу, причому для різних матеріалів, що обробляються, це співвідношення повинно знаходитися в різних межах [1].

Від співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші залежить тип полум'я, його ефективна потужність і температура. Регулювання витрат кисню та горючого газу в пальній суміші пальника візуально по виду полум'я приводить до значних похибок [2].

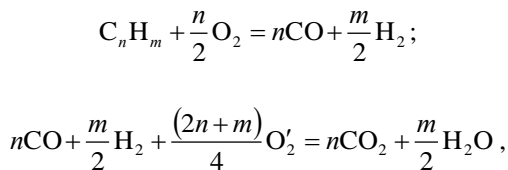
**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** Відомий спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників шляхом визначення парціального тиску  $\text{CO}_2$  по виміру абсолютної величини спектральної інтенсивності смуги випромінювання  $\text{CO}_2$  [3]. При цьому необхідно проводити складні випробування з підтриманням параметрів полум'я на заданому рівні для визначення максимального значення інтенсивності випромінювання. Величина інтенсивності випромінювання реального полум'я залежить від коливань витрат, тиску, хімічного складу суміші та інших факторів, які вносять в вимірювання додаткову похибку. Величину парціального тиску визначають за допомогою формули, що містить емпіричні коефіцієнти, в результаті чого контроль співвідношення кисню та горючого газу неможливо проводити оперативно та вчасно реагувати на його зміну.

Контроль стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші пального шляхом визначення хімічного складу продуктів згорання газоаналізаторами і хроматографами вимагають багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю [4].

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Неможливо виконувати контроль витрат кисню газових паливників без застосування складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю. Контроль співвідношення кисню та горючого газу неможливо проводити оперативно та вчасно реагувати на його зміну. Тому розробка методу контролю витрат кисню пального є актуальною задачею.

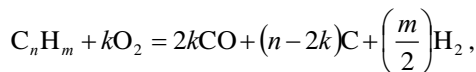
**Мета досліджень.** Спростити обладнання та прилади, скоротити час пошуку витрат кисню, яке відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в пальній суміші пального.

**Основна частина.** В результаті реакції горіння при стехіометричному співвідношенні в пальній суміші кисню та горючого газу кінцевими продуктами горіння є вуглекислий газ та вода. Реакція горіння проходить в дві стадії по схемі:



де  $C_nH_m$  – формула горючого газу;  $O_2$  – кисень пальної суміші;  $O'_2$  – кисень, що надходить з навколишнього повітря.

При недостатчі кисню в пальній суміші перша стадія реакції горіння проходить по схемі:



де  $k$  – кількість молекул кисню використаних в реакції горіння.

При цьому  $k < n/2$ , за межами ядра полум'я знаходяться продукти горіння  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  та тверді частинки сажового вуглецю. Частинки

сажі випромінюють як тверді тіла та мають суцільний спектр випромінювання з досить високим коефіцієнтом чорноти.

Вимірювання потоку випромінювання твердих частинок сажового вуглецю виконано оптико-електронним приладом (ОЕП) (рис. 1) в спектральному діапазоні електромагнітних хвиль  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м, який не співпадає по довжині електромагнітних хвиль зі смугами випромінювання газів, які входять до складу газоподібних продуктів полум'я [5].

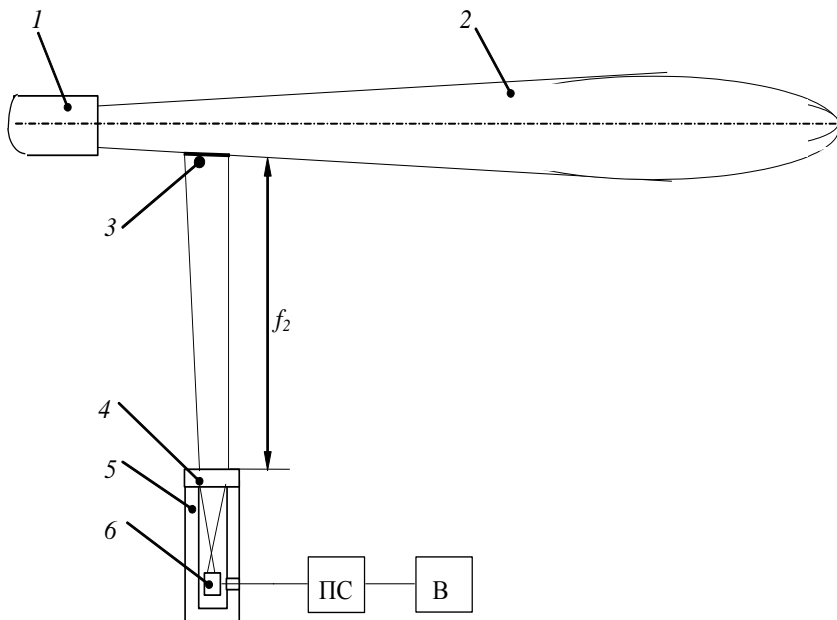


Рис. 1. Схема установки вимірювання потоку випромінювання сажового вуглецю полум'я:

1 – пальник; 2 – полум'я; 3 – майданчик візування; 4 – об'єктив; 5 – ОЕП; 6 – приймач випромінювання;  $f_2$  – відстань від об'єктива до майданчика візування; ПС – підсилювач сигналу; В – вольтметр

Потік випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ)  $\Phi_e$  в інтервалі довжин хвиль  $d\lambda$  і енергетичну світимість АЧТ  $M_e$  з площею видимої частини  $A_1$  визначають відповідно за формулами:

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda; \quad M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1}, \quad (2)$$

де  $\Phi_e$  – потік випромінювання АЧТ;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $M_e$  – енергетична світимість АЧТ;  $A_1$  – площа видимої частини, яка знаходиться в полі зору ОЕП [6].

Енергетичну світимість полум'я визначено за виразом:

$$M_{ест} = \varepsilon_n M_e, \quad (3)$$

де  $M_{ест}$  – енергетична світимість сірого тіла (полум'я);  $\varepsilon_n$  – ступінь чорноти полум'я пальника.

Ступінь чорноти полум'я пальника  $\varepsilon_n$  визначено за виразом:

$$\varepsilon_n = 1 - \exp(-\tau), \quad (4)$$

де  $\tau = \tau_r + \tau_a$  – оптична товщина полум'я, яка складається з оптичних товщин газів  $\tau_r$  та дисперсної фази полум'я  $\tau_a$  [7].

Так як в інтервалі довжин хвиль  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м гази прозорі [5], то  $\tau_r = 0$ , а оптичну товщину полум'я визначено за виразом:

$$\tau = \tau_a = k_\lambda s, \quad (5)$$

де  $k_\lambda$  – спектральний показник поглинання випромінювання частинками сажі;  $s$  – товщина шару полум'я по лінії візування [7].

Спектральний показник поглинання полум'я визначено за формулою:

$$k_\lambda = (\mu/\gamma) \cdot k(r_o), \quad (6)$$

де  $\mu$  – концентрація частинок сажового вуглецю;  $\gamma$  – густина частинок;  $k(r_o)$  – функція, яка визначається оптичними розмірами частинок [8].

З формул (3-6) витікає, що чим більша концентрація частинок сажового вуглецю в полум'ї, тим більша інтенсивність його світіння і тим вище коефіцієнт чорноти полум'я.

При стехіометричному співвідношенні кисню та горючого газу в пальній суміші гази згорають без залишку, за межами ядра полум'я вуглецю немає (див. формулу (1)). В цьому випадку  $\mu = 0$ ,  $k_\lambda = 0$ ,  $\tau = \tau_a = 0$ ,

$\tau_{\text{п}} = 0$ ,  $M_{\text{ест}} = \varepsilon_{\text{п}} M_e$  (див. формули (3-6)), потік випромінювання полум'я, а відповідно і напруга на виході ОЕП дорівнюють нулю, так як між потоком випромінювання полум'я і напругою на виході ОЕП існує зв'язок:

$$U = \tau_c \tau_0 M_e \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2f_1} \right)^2 SR_{33}; \quad M_e = \Phi_e / Q, \quad (7)$$

де  $U$  – напруга на виході ОЕП;  $\tau_c$  – коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем;  $\tau_0$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи;  $M_e$  – світимість тіла;  $D_{\text{вх}}$  – діаметр прийомної системи ОЕП;  $f_1$  – відстань від лінзи до зображення об'єкта;  $S$  – інтегральна чутливість приймача випромінювання;  $R_{33}$  – опір резистора зворотного зв'язку операційного підсилювача сигналу;  $\Phi_e$  – потік випромінювання частинок;  $Q$  – площа майданчика візування [9].

Технологічний процес формування полум'я пальника представимо, як об'єкт з одним входом та одним виходом. Статистичний зв'язок напруги на виході ОЕП та витратами кисню представлено функціональною залежністю:

$$U = f(V_k), \quad (8)$$

де  $V_k$  – витрати кисню.

При постійних витратах горючого газу  $V_{\text{п}}$  змінювали витрати кисню  $V_k$  з кроком  $h$ , та виконували вимірювання напруги на виході ОЕП. Початковий напрям руху робочої точки по характеристиці об'єкта вибрано в сторону збільшення  $V_k$ . Систематична похибка вимірювання напруги на виході пірметра дорівнює  $\Delta_c = 0,044$  В [10]. Звідси значення поправки  $\Delta_c = -c$ . Значення напруги з врахуванням поправки (табл. 1) визначено за виразом:

$$U'_i = U_i + c, \quad (9)$$

де  $U'_i$  – значення напруги на виході ОЕП  $i$ -того досліджу з врахуванням поправки;  $U_i$  – значення напруги на виході ОЕП  $i$ -того досліджу;  $c$  – поправка.

Таблиця 1

## Середні арифметичні значення напруги на виході ОЕП

Номер досліджу, $i$	$V_k$	$U_i$	$U'_i$	Номер досліджу, $i$	$V_k$	$U_i$	$U'_i$
1	5,5	6,6	6,556	7	8,5	1,0	0,956
2	6,0	3,2	3,156	8	9,0	0,42	0,376
3	6,5	2,8	2,756	9	9,5	0,08	0,036
4	7,0	2,8	2,756	10	10,0	0,044	0
5	7,5	2,4	2,356	11	10,5	0,044	0
6	8,0	1,75	1,706	12	11,0	0,044	0

По результатам експерименту побудовано криву залежності напруги на виході ОЕП від витрат кисню  $U = f(V_k)$ , яка є робочою характеристикою об'єкта дослідження (рис. 2).

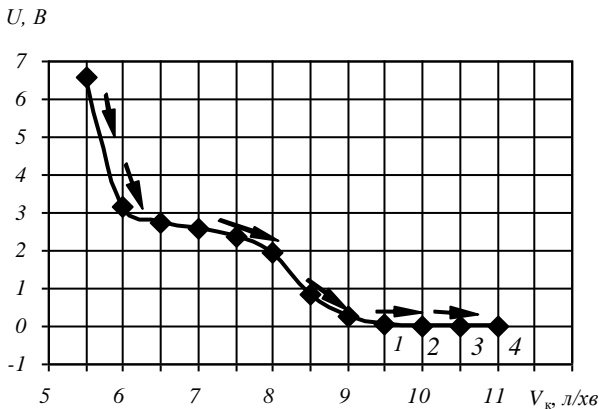


Рис. 2. Залежність напруги на виході ОЕП від витрат кисню (витрати ацетилену 9,0 л/хв)

Після цього шляхом аналізу результатів вимірювання визначено значення витрат кисню для яких напруга на виході ОЕП дорівнює 0: 10,0, 10,5 та 11,0 л/хв (див. точки 2, 3 та 4 на робочій характеристиці об'єкта дослідження). При витратах кисню 9,5 л/хв (точка 1) в полум'ї є залишки палива, так як є випромінювання вуглецю і напруга на виході ОЕП дорівнює 0,036 В. Точка 2 на робочій характеристиці об'єкта дослідження

відповідає найменшому значенню витрат кисню ( $10,0 < 10,5 < 11,0$  л/хв), при якому напруга на виході ОЕП дорівнює 0. Тоді значення витрат кисню  $V_{\text{кк}}$ , яке відповідає стехіометричному співвідношенню витрат кисню та ацетилену, визначено за спадом до нуля потоку випромінювання сажового вуглецю і дорівнює 10,0 л/хв.

Звідси, метод контролю витрат кисню  $V_{\text{кк}}$ , які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в пальній суміші пальника, полягає в тому, що при незмінних витратах горючого газу витрати кисню збільшують з кроком  $h$  і визначають величину витрат кисню  $V_{\text{кк}}$  (рис. 2) за спадом до нуля величини потоку випромінювання частинок сажового вуглецю за межами ядра полум'я [11].

**Дослідження похибок методу контролю.** Сумарна систематична похибка вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю складається з трьох складових: похибки, яка породжена поглинанням випромінювання середовищем, що знаходиться між полум'ям і ОЕП; похибки, яка породжена випромінюванням твердих домішок, що надходять в полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони; похибки, яка породжена випромінюванням стороннього джерела. Абсолютна систематична похибка вимірювання напруги на виході пірометра дорівнює  $\Delta_c = 0,044$  В [10]. Звідси визначено значення поправки  $\Delta_c = -c$ , яка дорівнює  $-0,044$  В.

Сумарна похибка результату визначення витрат кисню при контролі з регулюванням складається з двох складових: випадкової похибки результату визначення витрат кисню, яка залежить від значення абсолютної випадкової похибки вимірювання потоку випромінювання твердих частинок; методичної похибки, яка залежить від величини кроку пошуку. Регулювання витрат кисню виконано з кроком  $h = 0,5$  л/хв. Абсолютну методичну похибку  $\Delta_{V_h}$  визначено за формулою  $\Delta_{V_h} = h/2$  і дорівнює 0,25 л/хв., а відносну методичну похибку визначено за виразом:

$$\delta_{V_h} = (\Delta_{V_h} / V_{\text{кк}}) \cdot 100 \% \quad (10)$$

і при витратах кисню  $V_{\text{кк}} = 9,8$  л/хв отримано:  $(0,25/9,8) \cdot 100\% = 2,551\%$ . Приписаний закон розподілу похибок – рівномірний. Тоді  $\delta_{V_h}$  прийнято половиною ширини рівномірного закону розподілу і визначено середнє квадратичне відхилення відповідно як

$$\sigma_{V_h} = \delta_{V_h} / 1,73 \quad (11)$$



і дорівнює 1,475 %.

Випадкову похибку результату визначення витрат кисню отримано наступним чином. Випадкова похибка результату вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю (табл. 2) породжує залежну від неї похибку результату визначення витрат кисню.

Таблиця 2

**Значення абсолютних випадкових похибок результатів вимірювання напруги на виході ОЕП**

Номер повтору $j$	$\Delta U_j$ , В	Номер повтору $j$	$\Delta U_j$ , В	Номер повтору $j$	$\Delta U_j$ , В
1	-0,044	5	0,076	9	-0,004
2	-0,004	6	0,036	10	-0,044
3	0,036	7	-0,004	11	-0,004
4	-0,004	8	-0,044		

Рівняння математичної моделі технологічного процесу формування полум'я пальника має вид:

$$U = a_1 + a_2V^{-1} + a_3V^{-2} + a_4V^{-3} + a_5V^{-4}. \quad (12)$$

В рівнянні (10) надамо приросту аргументу функції та приросту функції і отримаємо:

$$(U + \Delta U_j) = a_1 + a_2(V + \Delta V_j)^{-1} + a_3(V + \Delta V_j)^{-2} + a_4(V + \Delta V_j)^{-3} + a_5(V + \Delta V_j)^{-4}, \quad (13)$$

де  $\Delta U_j$  – приріст функції;  $\Delta V_j$  – приріст аргументу функції.

Кожному  $j$ -тому значенню приросту аргументу функції відповідає  $j$ -те значення приросту функції. Абсолютна випадкова похибка результату пошуку значення витрат кисню є приростом аргументу функції (13), а абсолютна випадкова похибка результату вимірювання потоку випромінювання твердих частинок є приростом функції. Тоді рівняння (13) приймає вид:

$$(U + \Delta_{U_j}) = a_1 + a_2(V + \Delta_{V_j})^1 + a_3(V + \Delta_{V_j})^2 + a_4(V + \Delta_{V_j})^3 + a_5(V + \Delta_{V_j})^4, \quad (14)$$

де  $\Delta_{U_j}$  – випадкова похибка результату вимірювання потоку випромінювання твердих частинок сажового вуглецю;  $\Delta_{V_j}$  – випадкова похибка результату визначення витрат кисню.

Звідси, кожному значенню абсолютної випадкової похибки пошуку значення витрат кисню відповідає значення абсолютної випадкової похибки вимірювання потоку випромінювання твердих частинок. Шляхом табуляції рівняння (14) отримано таблицю похибок, по якій отримано значення випадкових похибок результату визначення витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню витрат кисню та горючого газу в пальній суміші пальника (табл. 3).

Таблиця 3

**Значення випадкових похибок та випадкових величин результату визначення витрат кисню**

Номер повтору $j$	$\Delta V_j$ , л/хв	$V_j$ , л/хв	Номер повтору $j$	$\Delta V_j$ , л/хв	$V_j$ , л/хв
1	-0,159	9,841	7	-0,010	9,990
2	-0,010	9,990	8	-0,159	9,841
3	-0,594	9,406	9	-0,010	9,990
4	-0,010	9,990	10	-0,159	9,841
5	-0,666	9,334	11	-0,010	9,990
6	-0,594	9,406			

Відносну випадкову похибку результату визначення витрат кисню (табл. 4) отримано за формулою:

$$\delta_{V_u} = \left( \frac{\Delta_{V_u}}{V} \right) \cdot 100 \%, \quad (15)$$

де  $\Delta_{V_u}$  – абсолютна випадкова похибка результату визначення витрат кисню;  $\delta_{V_u}$  – відносна випадкова похибка результату визначення витрат кисню.

Таблиця 4

**Значення випадкових похибок результатів визначення витрат кисню**

Номер повтору $j$	$\delta_{V_{iu}}$ %	Номер повтору $j$	$\delta_{V_{iu}}$ %	Номер повтору $j$	$\delta_{V_{iu}}$ %
1	1,625	5	6,807	9	0,102
2	0,102	6	6,071	10	1,625
3	6,071	7	0,102	11	0,102
4	0,102	8	1,625		

Тоді значення середнього квадратичного відхилення випадкової величини результату визначення витрат кисню від середнього арифметичного значення визначено за формулою:

$$\sigma(\delta) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (\delta_{V_{iu,j}})^2} \quad (16)$$

і дорівнює 3,6 %.

Випадкові похибки підпорядковані нормальному закону розподілу. Сумарну похибку результату визначення витрат кисню отримано за виразом [12]

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{V_{iu}}^2 + \sigma_{V_h}^2} \quad (17)$$

і дорівнює 3,9 %.

**Висновки**

Розроблений метод контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в пальній суміші пального, забезпечує повне згорання горючого газу та кисню без залишку, так як, контроль повного згорання горючого газу ведеться не по потоку випромінювання газоподібних продуктів згорання пальної суміші пального, а по потоку випромінювання залишку горючого газу в формі атомарного вуглецю (сажі) за межами ядра полум'я.

Операції вимірювання витрат кисню, витрат горючого газу та напруги на виході ОЕП виконують за допомогою простих приладів і не потребують високого рівня кваліфікації оператора.

Абсолютна систематична похибка вимірювання напруги на виході ОЕП дорівнює 0,044 В. Так як відомо значення та знак похибки, то вона може бути видалена шляхом введення поправки. Методичну похибку можна зменшити шляхом зменшення величини кроку пошуку.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Ольшанский Н. А. Сварка в машиностроении: справочник в 4 т. [Текст] / Н. А. Ольшанский. – М. : Машиностроение, 1978-1979.
2. Соколов И. И. Газовая сварка и резка металлов: учебник для техн. училищ / И. И. Соколов. – 2-е изд. – М. : Высшая школа, 1981. – 320 с.
3. А.с. СССР № 1151774, F23N 5/08, заявл. От 23.04.85.
4. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплотехнических процессов» [Текст] / В. П. Преображенский. – 3-е изд. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
5. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць ЖДТУ. – 2006. – № 4. – С. 69-76.
6. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения [Текст] / Ю. Г. Якушенков. – М. : Сов. радио, 1977. – 272 с.
7. Блох А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов [Текст] / А. Г. Блох. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 240 с.
8. Поскачей А. А. Оптико-электронные измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
9. Ночвай В. М. Встановлення зв'язку між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Тези VI Міжнарод. наук.-практ. конф. «Практична космонавтика і високі технології», присвяч. 100-річчю з дня народження академіка С. П. Корольова. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – С. 95–96.
10. Ночвай В. М., Петрук В. Г. Дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок / В. М. Ночвай, В. Г. Петрук // Вісник ЖДТУ. – 2008. – № 4. – С. 43–48.
11. Пат. UA 76332 У Україна, МКІ P23N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / В. М. Ночвай, В. В. Серов, (Україна); № 20041008025; Заявл. 04.10.2004. Опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7.
12. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

УДК 681.518.5

## МЕТОД КОНТРОЛЮ СТАНУ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ЗА СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ЗАВИСЛИХ ЧАСТИНОК

В.Г. Петрук В.Г., С.М. Кватернюк, О.Є. Кватернюк, В.М. Ночвай

*Запропоновано метод контролю стану полідисперсних водних середовищ, який полягає у порівнянні масивів спектрополяриметричних зображень завислих частинок за допомогою ПЗЗ-камери на характеристичних довжинах хвиль пігментів при встановлених положеннях кутів поляризатора і аналізатора, що дозволяє більш достовірно ідентифікувати тип частинок та підвищити вірогідність контролю.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Контроль екологічного стану природних екосистем займає важливе місце в загальній системі охорони природи і є важливим компонентом забезпечення сталого розвитку суспільства. Проте автоматизований контролю стану екосистем розвинутий недостатньо, оскільки інтегральні показники, за якими оцінюється їх стан, у значній мірі є відносними і суб'єктивними. У даній роботі запропоновано єдиний підхід до контролю стану полідисперсних водних середовищ (ПВС), які є складовою частиною значної кількості об'єктів природного походження. Полідисперсні водні середовища – складні полідисперсні системи, що включають в себе частинки різних типів, розмірів і форми, які знаходяться у завислому стані в колоїдних розчинах та перебувають у складній взаємодії. Частинки ПВС переважно є біологічними клітинами та їх агломератами. Основним параметром ПВС, як об'єкту контролю, є об'ємні концентрації частинок різних типів. До ПВС, які є об'єктом контролю у даній роботі, відносять природні водно-дисперсні середовища

водних об'єктів, гуморальні (життєзабезпечуючі) середовища живих організмів та ін. У ряді стандартів відзначено гранично допустимі об'ємні концентрації частинок для конкретного типу ПВС. Однак, у ряді випадків, необхідно контролювати об'ємні концентрації та співвідношення між ними для частинок певних типів, що характеризує стан ПВС у межах норми та дозволяє його прогнозувати. Для визначення об'ємної концентрації частинок певних типів необхідно спочатку здійснити їх ідентифікацію на основі порівняння оптико-фізичних параметрів завислих частинок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми.** Було проаналізовано експериментальні методи контролю стану ПВС та структурні схеми засобів контролю, що їх реалізують. При цьому електрохімічні методи – кондуктометричний та електрокінетичний володіють недостатньою чутливістю та не дозволяють надійно ідентифікувати завислі частинки різних типів.

На противагу ним оптичні методи дозволяють порівняти значно більшу кількість параметрів частинок [1]. Ряд оптичних методів дають інтегральні параметри, що характеризують ПВС загалом – середні розміри частинок, ступінь дисперсності, середню концентрацію та не дозволяють у повній мірі досліджувати параметри окремих частинок. У реальних ПВС, що мають велику кількість груп частинок, такий підхід не дозволяє отримати співвідношенням між об'ємною концентрацію частинок різних груп, що визначає стан ПВС. Скануюча проточна цитометрія дозволяє визначати розмір і показник заломлення окремих часток. Недоліком її є неможливість досліджувати частинки з великим діапазоном розмірів, а також їх комбінації, що обмежується розмірами потоку створеного гідрофокусуною головкою, а також деформацією частинок складної форми. Для дослідження частинок ПВС широко застосовують методи мікроскопії [3]. Однак вони потребують вдосконалення для врахування світлорозсіювання у внутрішніх неоднорідностях завислих частинок ПВС, які є співрозмірними з довжиною хвилі зондуючого випромінювання.

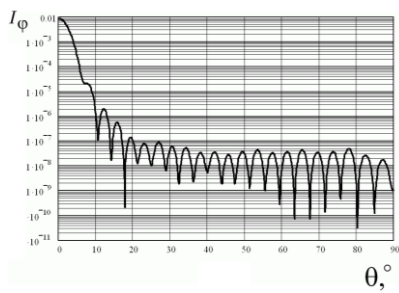
**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Найбільш повно розсіювання світла окремими частинками описується за допомогою параметрів Стокса та елементів матриці Мюллера. Причому для сферичних частинок матриця Мюллера спрощується. При поляриметрії зображень здійснюється реєстрація зображення для елементів матриці Мюллера, що утворене після проходження випромінювання через кювету з ПВС. При спектрополяриметрії зображень аналогічні вимірювання здійснюють на різних довжинах хвиль,

що дозволяє врахувати спектральні особливості пігментів завислих частинок [2, 4]. Такий метод є найбільш перспективним для подальших досліджень, оскільки дозволяє отримати оптико-фізичні параметри ПВС, які пов'язані з властивостями їх завислих частинок. Невирішеною раніше частиною загальної проблеми є подальше вдосконалення спектрополяриметричного методу відповідно до особливостей ПВС, як об'єктів контролю. Завислі частинки ПВС переважно є оптично м'якими, тобто показник їх заломлення близький до оточуючого середовища. При цьому виконується умова  $|m-1| \gg 1$ , де  $m$  – відносний показник заломлення. Це дозволяє використовувати для аналізу перенесення випромінювання разом з точними методами і наближені підходи.

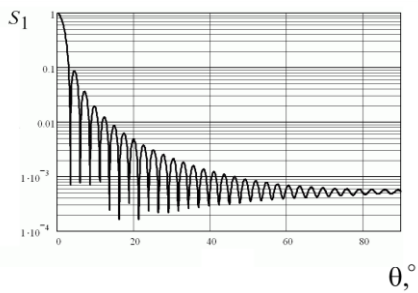
**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Актуальність роботи викликана необхідністю розроблення нових методів та засобів контролю стану полідисперсних водних середовищ (ПВС), оскільки для традиційних характерні низькі значення швидкодії та вірогідності контролю, що пов'язано з необхідністю врахування багатьох параметрів завислих частинок, які залежать від їх форми, складної внутрішньої будови, анізотропності, спектральних і поляризаційних властивостей з метою подальшої ідентифікації та визначення об'ємних концентрацій і співвідношень між ними. Об'єктом дослідження є процес контролю стану ПВС. Предмет дослідження – метод та засоби контролю стану ПВС за спектрополяриметричними зображеннями завислих частинок та їх метрологічні характеристики. Метою дослідження є підвищення швидкодії та вірогідності контролю стану ПВС за спектрополяриметричними зображеннями завислих частинок, на основі яких визначаються їх об'ємні концентрації та розроблення відповідних методу і засобів контролю.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Здійснено математичне моделювання перенесення випромінювання частинками ПВС в рамках теорії Мі та наближення Релея-Ганса-Дебая. При моделюванні частинок ПВС замінені еквів'ємними однорідними кулями може застосовуватись теорія Мі (рис. 1, а). Ці припущення виправдані тільки за спеціальних умов, таких як сферизація зі збереженням об'єму чи осмотичне набухання [1]. Для аналізу частинок більш складної форми та внутрішньої будови такий підхід неприйнятний.

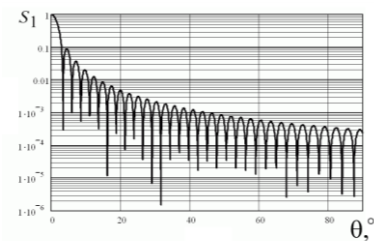
Для наближеного моделювання перенесення випромінювання частинками ПВС, які місять ядро та гранули, використано наближення Релея-Ганса-Дебая



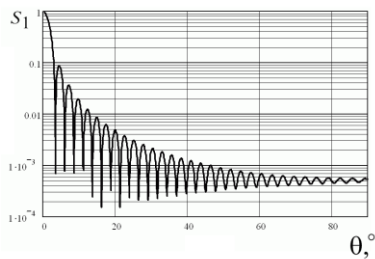
a)



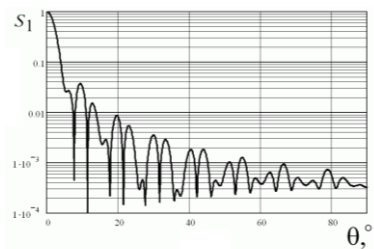
б)



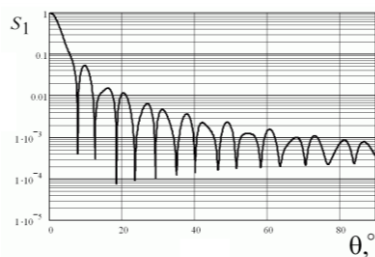
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Індикатриси розсіювання частинок ПВС у рамках теорії Мі (а) та наближення Релея-Ганса-Дебая при різних розмірах гранул 0,1 мкм (б) та 0,02 мкм (в) та відносному показнику заломлення ядра 1,015 (г); 1,1 (д); 1,2 (е)



$$\begin{aligned}
\langle |S_1(\theta)|^2 \rangle = & \left| \frac{2}{3} \rho_c^3 \right|^2 \left( (m_c - 1) h_s(\rho_c, \theta) + f_1 (m_{core} - m_c) h_s(\rho_{core}, \theta) + \right. \\
& + f_2 (m_g - m_c) h_s(\rho_g, \theta) h_s(\rho_c - \rho_g, \theta) \left. \right)^2 + \\
& + \left| f_2 (m_g - m_c) h_s(\rho_g, \theta) \right|^2 [1 - h_s^2(\rho_c - \rho_g, \theta)] / N, \tag{1}
\end{aligned}$$

де  $m_c, m_g, m_{core}$  – відносні показники заломлення клітини, гранул та ядра;  $\rho_c, \rho_g, \rho_{core}$  – дифракційні параметри клітини, гранул та ядра;  $f_1$  – об’ємна частина ядра,  $f_2$  – об’ємна частина гранул,  $h_s(\rho, \theta)$  – форм-фактор.

Це дозволило оцінити загальні закономірності зміни індикатрис розсіювання при різних розмірах гранул та зміні показника заломлення ядра (рис. 1, б-е).

Збільшення розміру гранул, а, відповідно, і збільшення їх об’ємної частки призводить до згладжування бічних пелюсток індикатрис (рис. 1, б-в). При збільшенні відносного показника заломлення ядра його вплив на загальну індикатрису зростає (рис. 1, г-е).

Також здійснено математичне моделювання перенесення випромінювання на основі методу Монте-Карло та гібридної апроксимації. Для моделювання форми зовнішньої поверхні частинок використано формулу овалу Кассіні

$$\rho = \pm \sqrt{c^2 \cos 2\varphi \pm \sqrt{c^4 \cos^2 2\varphi + a^4 - c^4}}. \tag{2}$$

При відповідному підборі коефіцієнтів такий підхід дозволяє отримати профіль частинки близький до визначеного за допомогою електронного мікроскопу.

Світлорозсіювання зовнішньої поверхні частинки моделюється за допомогою геометричної оптики та дифракції Фраунгофера, а світлорозсіювання ядра та гранул визначається індикатрисами, розрахованими за теорією Мі та методом дискретних диполів. Просторовий розподіл генерації джерела фотонів за методом Монте-Карло здійснюється за допомогою функцій, що генерують випадкові числа. Точка перетину падаючого променя та поверхні частинки визначається за допомогою вирішення чисельним методом такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} m_{p1_0}t + x_{A0} = \sin(\varphi)\cos(\theta)\rho(\varphi, \theta); \\ m_{p1_1}t + y_{A0} = \sin(\varphi)\sin(\theta)\rho(\varphi, \theta); \\ m_{p1_2}t + z_{A0} = \cos(\theta)\rho(\varphi, \theta). \end{cases} \quad (3)$$

У точці падіння визначається нормаль до поверхні кути падіння, відбивання та заломлення, а також вісь обертання та матриця повороту. Коефіцієнти відбивання та пропускання визначаються за формулами Френеля. На основі цього далі визначаються наступні похідні променя та процес обчислень повторюється. При проходженні променя всередині частинки на його шляху може опинитись одна з гранул чи ядро. Тоді подальший шлях променя буде визначатись згідно з індикатрисами цих включень. При проходженні фотона через зовнішнє середовище, цитоплазму частинки, ядро чи гранули він може поглинутись з ймовірністю, що визначається коефіцієнтом поглинання середовища та довжиною шляху. Після знаходження всіх похідних променів визначаються довжини відрізків, які проходить кожний промінь, а також відповідні коефіцієнти пропускання та зсув фази коливання. На основі цього визначається s- та р-компоненти випромінювання та їх усереднені значення в площині екрану. На основі розрахованих усереднених компонент випромінювання можливо обчислити параметри Стокса та елементи матриці Мюллера у кожній точці зображення. Вони характеризують форму, внутрішню будову, анізотропність, спектральні і поляризаційні властивості завислих частинок та дозволяють надійно розділити частинки різних груп, визначити об'ємні концентрації та співвідношення між ними.

Метод контролю стану ПВС полягає у порівнянні масивів спектрополяриметричних зображень завислих та зразкових частинок отриманих *in vitro* за допомогою ПЗЗ-камери у складі розроблених засобів контролю на характеристичних довжинах хвиль пігментів при встановлених положеннях кутів поляризатора і аналізатора, що дозволяє більш достовірно їх ідентифікувати, визначати об'ємні концентрації та кількісні співвідношення між частинками певних типів.

Для реалізації запропонованого методу розроблена така структурна схема засобу контролю стану ПВС за спектрополяриметричними зображеннями завислих частинок (рис. 3). Випромінювання від джерела випромінювання (ДВ) – перестроюваного монохроматора проходить крізь волоконно-оптичних хвилевід (ВОХ) до поляриметричної системи та потрапляє на поляризатор (П) та компенсатор (К), проходить проточну

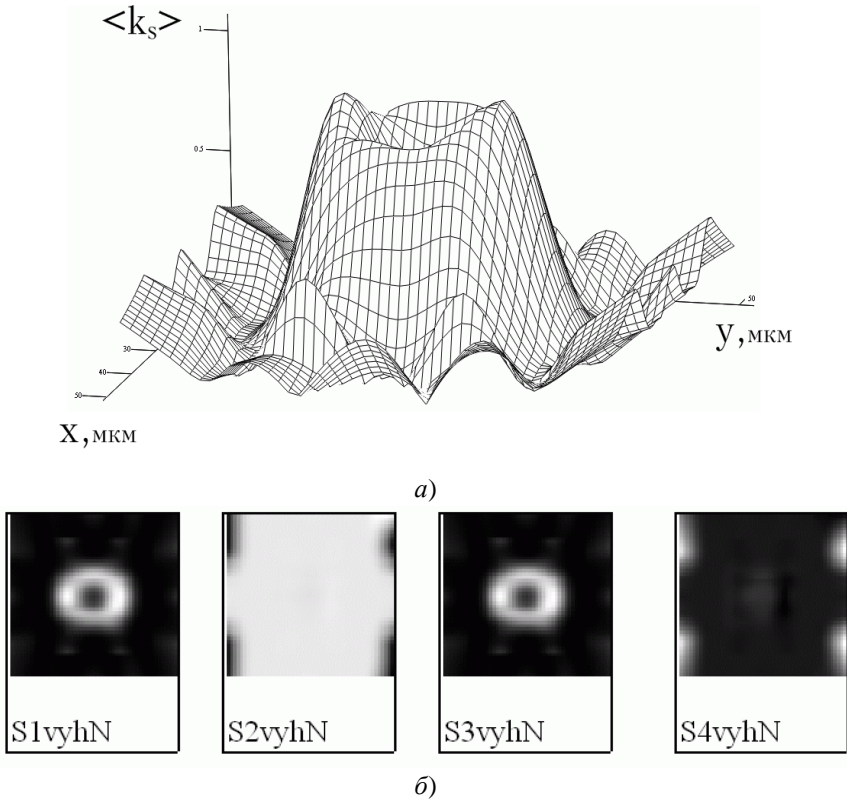


Рис. 2. Усереднена амплітуда s-компоненти випромінювання (а) та параметри Стокса для вихідного зображення (б)

вимірювальну кювету (ВК) з тонким шаром досліджуваної ПВС. При підготовці до експерименту кювету промивається стандартним розчином за допомогою промиваючого насосу (ПН). Оскільки параметри ПВС суттєво залежать від температури до вимірювальної кювети підключено цифровий сенсор температури (СТ) та термостат (Т). Сформовані спектрополяриметричні зображення завислих частинок потрапляють на ПЗЗ-камеру через аналізатор (А) та оптичну систему, що складається з об'єктива (ОБ) та окуляра (ОК). Далі цифрове зображення передається для подальшої обробки та визначення об'ємних концентрацій частинок певних типів у персональний комп'ютер (ПК). Робота крокових двигунів, що обертають елементи поляриметричної системи та змінюють довжину

хвилі монохроматора контролюється через блок керування кроковими двигунами (БККД) та мікро контролер (МК). При виготовленні пристрою у переносному варіанті монохроматор можливо замінити на лінійку над'яскравих світлодіодів з світлофільтрами чи напівпровідникових лазерів, що працюють на заданих характеристичних довжинах хвиль.

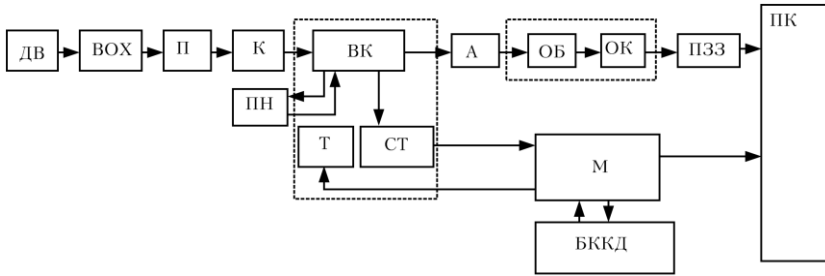


Рис. 3. Структурна схема засобу контролю стану ПВС

Узагальнена схема перетворення інформативного сигналу у засобі контролю має такий вигляд (рис. 4.). На похибку визначення об'ємної концентрації частинок за спектрополяриметричними зображеннями впливають похибки визначення контрасту та відстані між дифракційними максимумами, які, в свою чергу, залежать від решти впливних факторів. Практично всі складові похибки є некорельованими за виключенням похибок встановлення азимутальних кутів елементів поляризаційної системи, які складаються через коефіцієнти впливу.



Рис. 4. Узагальнена схема перетворення інформативного сигналу у засобі контролю

Загальне рівняння перетворення інформативного оптичного сигналу до входу ПЗЗ камери розробленого засобу контролю таке:

$$S = \tau_m \cdot \tau_{\text{вох}} \cdot 0,5 \tau_{n1\_0} \cdot \tau_{\text{вк}} (1 - r_{\text{вк}}) \cdot \frac{\int_{-\Delta\varphi_1/2}^{\Delta\varphi_1/2} \int_{-\Delta\theta_1/2}^{\Delta\theta_1/2} I'(\varphi, \theta) d\varphi d\theta}{2\pi^2\pi \int_0^{\Delta\varphi_1/2} \int_0^{\Delta\theta_1/2} I'(\varphi, \theta) d\varphi d\theta} \cdot \tau_{n2\_0} \cos(\theta_2 - \theta_1) \cdot \tau_{\text{вт.об.}} (1 - r_{\text{об}}) \cdot \tau_{\text{вт.ок.}} (1 - r_{\text{ок}}) \cdot \frac{\int_{-\Delta x(i-1)-\Delta y(i-1)}^{\Delta x i} \int_0^{\Delta y i} I'(x, y) dx dy}{\int_0^{x_{\max}} \int_0^{y_{\max}} I'(x, y) dx dy},$$

де  $\tau_m$ ,  $\tau_{\text{вох}}$ ,  $\tau_{n1\_0}$ ,  $\tau_{\text{вк}}$ ,  $\tau_{n2\_0}$ ,  $\tau_{\text{вт.об.}}$ ,  $\tau_{\text{вт.ок.}}$  – коефіцієнти пропускання елементів оптичної системи;  $r_{\text{вк}}$ ,  $r_{\text{об}}$ ,  $r_{\text{ок}}$  – коефіцієнти, що враховують відбивання від елементів оптичної системи;

$$\frac{\int_{-\Delta\varphi_1/2}^{\Delta\varphi_1/2} \int_{-\Delta\theta_1/2}^{\Delta\theta_1/2} I'(\varphi, \theta) d\varphi d\theta}{2\pi^2\pi \int_0^{\Delta\varphi_1/2} \int_0^{\Delta\theta_1/2} I'(\varphi, \theta) d\varphi d\theta} \text{ – коефіцієнт передачі вимірювальної кювети;}$$

$$\frac{\int_{-\Delta x(i-1)-\Delta y(i-1)}^{\Delta x i} \int_0^{\Delta y i} I'(x, y) dx dy}{\int_0^{x_{\max}} \int_0^{y_{\max}} I'(x, y) dx dy} \text{ – коефіцієнт передачі світлового потоку, що}$$

падає на елемент матриці ПЗЗ-камери.

Спектрополяриметричні зображення частинок, що визначаються їх формою та структурою, передаються на ПЗЗ-камеру. Поріг чутливості пристрою визначається кутами реєстрації індикатриси розсіювання завислих частинок на мінімальній довжині хвилі:

$$\Delta\varphi_{1\min} = \arctg \frac{\Delta a \cdot N_x}{\Delta t_{\text{кюв}} k_{1\max} k_2}; \quad \Delta\theta_{1\min} = \arctg \frac{\Delta b \cdot N_y}{\Delta t_{\text{кюв}} k_{1\max} k_2}, \quad (5)$$

де  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  – розміри фоточутливого елемента матриці;  $N_x$ ,  $N_y$  – розмірність матриці;  $\Delta t_{\text{кюв}}$  – глибина кювети;  $k_{1\max}$ ,  $k_2$  – максимальне збільшення об'єктивна та окуляра.

Виходячи з максимального дифракційного параметру частинок  $\rho = (\pi D/\lambda_{\min})m_0$  визначимо мінімальні розміри частинок:

$$X_{\min} = \frac{4\lambda_{\min}}{\Delta\varphi_{1\min(\text{rad})}m_0}; Y_{\min} = \frac{4\lambda_{\min}}{\Delta\theta_{1\min(\text{rad})}m_0}. \quad (6)$$

При  $\lambda_{\min}=190$  нм та  $m_0 = 1,33 - X_{\min} = 0,98$  мкм,  $Y_{\min} = 1,19$  мкм.

**Висновки.** Вперше запропоновано метод контролю стану ПВС, який полягає у порівнянні масивів спектрополяриметричних зображень досліджуваних та зразкових частинок *in vitro* отриманих за допомогою ПЗЗ-камери розробленого засобу контролю на характеристичних довжинах хвиль пігментів при встановлених положеннях кутів поляризатора і аналізатора, що дозволяє більш достовірно ідентифікувати тип частинок, а це у порівнянні з відомими методами, дає можливість підвищити вірогідність контролю стану ПВС. Розроблено структурну схему засобу контролю стану ПВС на основі порівняння масивів спектрополяриметричних зображень, що дозволило підвищити швидкодію та вірогідність контролю. Визначено рівняння перетворення інформативного сигналу у вимірювальному каналі засобу контролю, що дало можливість врахувати впливні фактори. Проаналізовано поріг чутливості засобу контролю та визначено мінімальні розміри частинок ПВС, які можуть досліджуватись та порівнюватись.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Лопатин В. Н. Введение в оптику взвесей клеток / В. Н. Лопатин, Ф. Я. Сидько. – Новосибирск : Наука, 1988. – 240 с.
2. Петрук В. Г. Спектрополяриметричні методи та засоби дослідження параметрів гуморальних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський [та ін.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2009, №1 (17). – С.128–131.
3. Єльнікова Т. О. Автоматизована система для вимірювання геометричних параметрів фітопланктону / Т. О. Єльнікова // Вісник ЖДТУ. – 2009. – №1. – С. 160–164.
4. Петрук В. Г. Неінвазійний спектрополяриметр зображень для дослідження біотканин та гуморальних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський [та ін.] // Вісник ВПІ. – 2009. – № 5. – С. 15–19.

УДК 621.317.39.084.2

## **ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ДОПУСКОВОГО ІНТЕРВАЛУ ДЛЯ ЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА ПРИ КОНТРОЛІ ВИТРАТ КИСНЮ ПАЛЬНИКА**

В.М. Ночвай

*В роботі запропоновано методику визначення меж допускового інтервалу для значення інформативного параметра за межами допускового інтервалу для значення контрольованого параметра. Приведено результати досліджень методу контролю витрат кисню пального з застосуванням розробленої методики.*

**Актуальність та постановка проблеми.** При напилюванні покриттів, а також при зварюванні сталей, процес ведуть нормальним полум'ям. Якість наплавленого металу і міцність зварного шва залежить від складу полум'я, тому під час зварювання зварник повинен слідкувати за його типом, регулювати його склад на протязі всього процесу зварювання [1].

З метою отримання нормального (нейтрального) типу полум'я необхідно вести контроль витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу в пальній суміші пального. При виконанні контролю необхідно встановити межі допускового інтервалу для значення контрольованого параметра – витрат кисню. Так як значення витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші пального, невідоме до початку контролю, то необхідно визначити верхню та нижню межі допускового інтервалу для значення інформативного параметра – напруги на виході оптико-електронного приладу (ОЕП).

**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** При виконанні контролю якості продукції встановлюють верхню та нижню межі допускового інтервалу для значення контрольованого параметра [2, 3]. При активному контролі з регулюванням витрат кисню пального вимірюють напругу на виході ОЕП, а контрольованим параметром є

витрати кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші пального. Значення контрольованого параметра до завершення контролю залишається невідомим, так як інформативним параметром є напруга на виході ОЕП [4].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** При активному контролі з регулюванням витрат кисню пального невизначено верхню та нижню межі допускового інтервалу для значення інформативного параметра – напруги на виході ОЕП.

**Мета досліджень.** Розробити методику визначення меж допускового інтервалу для значення інформативного параметра за межами допускового інтервалу для значення контрольованого параметра.

**Основна частина.** Метод контролю витрат кисню  $V_{\text{кк}}$ , які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші пального, полягає у тому, що при незмінних витратах пального газу витрати кисню збільшують з кроком  $h$  і визначають величину витрат кисню  $V_{\text{кк}}$  за спадом до нуля величини потоку випромінювання частинок сажового вуглецю за межами ядра полум'я [4, 5].

При контролі витрат кисню  $V_{\text{кк}}$  визначено нижню  $V_{\text{кН}} = V_{\text{кк}} - 0,5$  л/хв та верхню  $V_{\text{кВ}} = V_{\text{кк}}$  межі допускового інтервалу для значення контрольованого параметра. Так як значення витрат кисню  $V_{\text{кк}}$  невідоме до завершення контролю, а відоме значення інформативного параметра – напруги на виході ОЕП, яка дорівнює 0 В при витратах кисню  $V_{\text{кк}}$ , то необхідно визначити і прийняти нижню та верхню межі допускового інтервалу для значення інформативного параметра.

Як видно з рівняння математичної моделі (ММ) полум'я пального, яке має вид

$$U = a_1 + a_2V^{-1} + a_3V^{-2} + a_4V^{-3} + a_5V^{-4}, \quad (1)$$

де  $U$  – напруга на виході ОЕП;  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – параметри ММ;  $V$  – витрати кисню, напруга на виході ОЕП та витрати кисню знаходяться в обернено пропорційній залежності.

Звідси витікає, що верхній межі для значення контрольованого параметра  $V_{\text{кВ}}$  відповідає нижня межа допускового інтервалу для значення інформативного параметра  $U_{\text{Н}}$ , а нижній межі для значення контрольованого параметра  $V_{\text{кН}}$  відповідає верхня межа допускового інтервалу для значення інформативного параметра  $U_{\text{В}}$  (рис. 1).



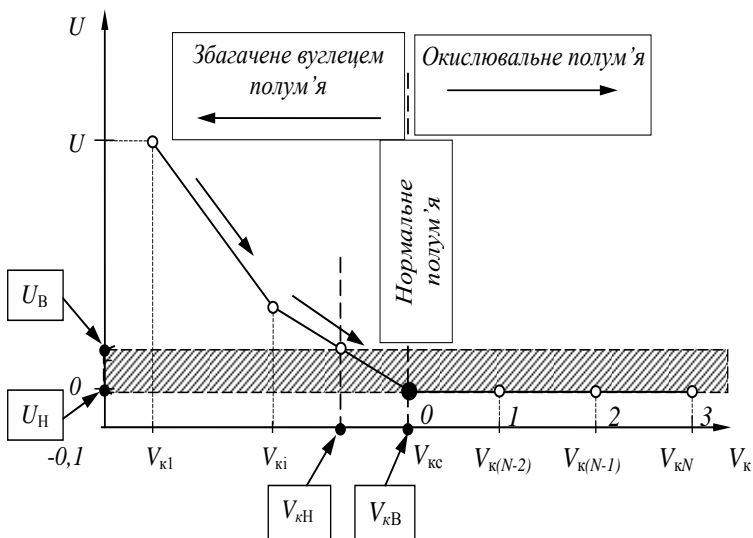


Рис. 1. Межі допускового інтервалу при виконанні активного контролю з регулюванням витрат кисню у пальній суміші пального:

$V_{кН}$ ,  $V_{кВ}$  – нижня та верхня межі допускового інтервалу для значення контрольованого параметра;  $U_H$ ,  $U_B$  – нижня та верхня межі допускового інтервалу для значення інформативного параметра

Межі допускового інтервалу для значення інформативного параметра визначено з використанням рівняння ММ полум'я пального. У рівнянні (1) надамо приросту аргументу функції та приросту функції і отримаємо:

$$(U + \Delta U_j) = a_1 + a_2(V + \Delta V_j)^{-1} + a_3(V + \Delta V_j)^{-2} + a_4(V + \Delta V_j)^{-3} + a_5(V + \Delta V_j)^{-4}, \quad (2)$$

де  $\Delta U_j$  – приріст функції;  $\Delta V_j$  – приріст аргументу функції.

Кожному  $j$ -тому значенню приросту аргументу функції відповідає  $j$ -те значення приросту функції. Нижня  $U_H$  та верхня  $U_B$  межі допускового інтервалу для інформативного параметра є приростом функції, а нижня  $V_{кН}$  та верхня  $V_{кВ}$  межі допускового інтервалу для значення контрольованого параметра є приростом аргументу функції. Для

прийнятих верхньої  $V_{KB} = V_{KC}$  та нижньої  $V_{KH} = V_{KC} - h$ , де  $h = 0,5$  л/хв – крок зміни значення контрольованого параметра, меж допускового інтервалу для значення контрольованого параметра шляхом математичного моделювання відповідно отримано:

$$(0+0) = a_1 + a_2(V_{KC} + 0)^{-1} + a_3(V_{KC} + 0)^{-2} + a_4(V_{KC} + 0)^{-3} + a_5(V_{KC} + 0)^{-4}, \quad (3)$$

$$(0+0,02) = a_1 + a_2(V_{KC} - 0,5)^{-1} + a_3(V_{KC} - 0,5)^{-2} + a_4(V_{KC} - 0,5)^{-3} + a_5(V_{KC} - 0,5)^{-4}. \quad (4)$$

З рівнянь (3) та (4) визначено нижню  $U_H = \Delta U_j = 0$  В та верхню  $U_B = \Delta U_j = 0,02$  В межі допускового інтервалу для значення інформативного параметра.

Вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю виконано ОЕП, який встановлено на відстані 0,3 м від осі струменя пальника. Проведено 5 експериментів при витратах ацетилену 6,6, 8, 9, 10 та 11,4 л/хв. Для вимірювання і точного регулювання витрат газів застосовано ротаметри мод. ДЕМ 3486011П. Початковий напрям руху робочої точки по характеристиці об'єкта вибрано у сторону збільшення витрат кисню  $V_K$  і зміну параметра виконано з кроком 0,5 л/хв. Встановлено, що при збільшенні витрат кисню та при незмінних витратах ацетилену потік випромінювання частинок сажового вуглецю зменшується і відповідно зменшується напруга на виході ОЕП (рис. 2).

При витратах кисню 7,0, 7,5 та 8,0 л/хв напруга на виході ОЕП дорівнює 0 В (див. точки 2, 3 та 4 на робочій характеристиці об'єкта). При витратах кисню 6,5 л/хв (точка 1) у полум'ї є залишки палива, так як є випромінювання вуглецю і при цьому напруга на виході ОЕП дорівнює 0,036 В. Так як  $7,0 < 7,5 < 8,0$  л/хв, то точка 2 відповідає найменшому значенню витрат кисню при якому напруга на виході ОЕП дорівнює 0 В. Значення витрат кисню  $V_{KC}$ , яке відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та ацетилену у пальній суміші, визначено за спадом до нуля потоку випромінювання сажового вуглецю і дорівнює 7,0 л/хв.

При контролі витрат кисню пальника визначено і прийнято нижню  $U_H = 0$  В та верхню  $U_B = 0,02$  В межі допускового інтервалу для інформативного параметра (рис. 3).

$U, B$

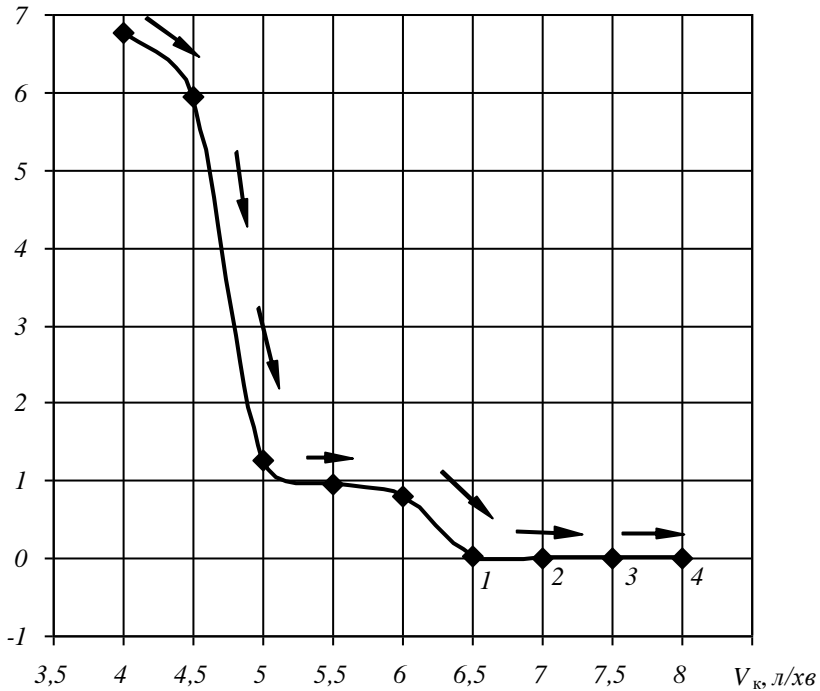


Рис. 2. Залежність напруги на виході ОЕП від витрат кисню (витрати ацетилену 6,6 л/хв)

Об'єкт непридатний, якщо значення параметра  $U$ , що вимірюють, (напруга на виході ОЕП) знаходиться за межами допускового інтервалу  $U > U_B$ , при цьому  $V_k < V_{кН}$  – отримано полум'я збагачене вуглецем. Об'єкт придатний, якщо виконується умова  $U_H \leq U_i \leq U_B$ . При цьому: витрати кисню  $V_{кк}$  дорівнюють 7,0 л/хв (рис. 3) і відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та ацетилену у пальній суміші палика; витрати кисню збільшувати припиняють; отримано нормальне (нейтральне) полум'я; результат вимірювального контролю – об'єкт придатний (табл. 1).

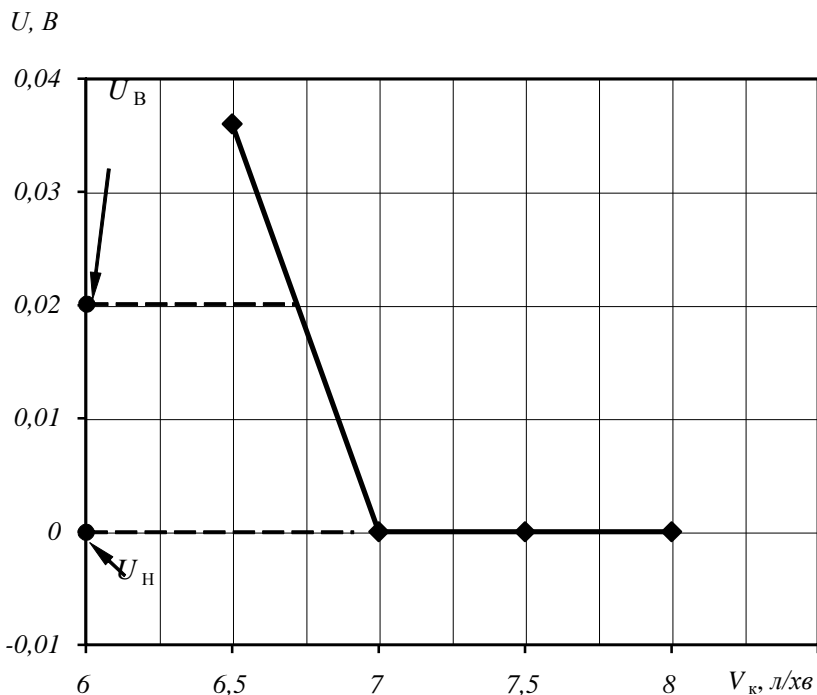


Рис. 3. Довірчі межі допускового інтервалу при контролі витрат кисню (витрати ацетилену 6,6 л/хв)

Таблиця 1

**Результати контролю витрат кисню пальника**

Номер досліду, $I$	$V_{ki}$ , л/хв	$U$ , B	Перевірка виконання умови $U_H \leq U \leq U_B$ , B	Результати контролю
1	4,0	6,756	$0 < 6,756 > 0,02$	Об'єкт не придатний
2	4,5	5,956	$0 < 5,956 > 0,02$	Об'єкт не придатний
3	5,0	1,256	$0 < 1,256 > 0,02$	Об'єкт не придатний
4	5,5	0,956	$0 < 0,956 > 0,02$	Об'єкт не придатний
5	6,0	0,796	$0 < 0,796 > 0,02$	Об'єкт не придатний
6	6,5	0,036	$0 < 0,036 > 0,02$	Об'єкт не придатний
7	7,0	0	$0 = 0 < 0,02$	Об'єкт придатний

## Висновки

Межі допускового інтервалу для інформативного параметра можна визначити: шляхом розрахунку за рівнянням ММ полум'я пальника; по таблиці приростів аргументу та функції, яку отримано шляхом табуляції рівняння (2); шляхом математичного моделювання полум'я пальника.

Для прийнятих нижньої  $V_{кН} = V_{кС} - 0,5$  л/хв (крок зміни значення контрольованого параметра  $h = 0,5$  л/хв) та верхньої  $V_{кВ} = V_{кС}$  меж допускового інтервалу для значення контрольованого параметра співвідношення кисню та пального газу у пальній суміші пальника  $\beta$ , яке визначають за формулою

$$\beta = \frac{V_{к}}{V_{г}} = \frac{V_{кС} - h}{V_{г}}, \quad (5)$$

де  $V_{г}$  – витрати пального газу;  $V_{к}$  – витрати кисню, буде знаходитись у межах  $0,98 \div 1,06$  (при витратах ацетилену 6,6 л/хв), що є задовільним показником нормального (нейтрального) типу полум'я.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Ольшанский Н. А. Сварка в машиностроении: справочник в 4 т. / Н. А. Ольшанский. – М.: Машиностроение, 1978-1979.
2. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. посіб. / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.
3. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ : теорія і практика оптичного вимірювального контролю / В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 207 с.
4. Ночвай В. М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 6. – С. 30–40.
5. Пат. UA 76332 U Україна, МКІ P23N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / В. М. Ночвай, В. В. Серов, (Україна); № 20041008025; Заявл. 04.10.2004. Опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7.

УДК 621.317.39.084.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ВУГЛЕЦЮ ПОЛУМ'Я ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА

В.М. Ночвай

*В роботі досліджено радіаційні характеристики твердих частинок вуглецю полум'я в інтервалі довжин хвиль 0,5...1,1 мкм.*

**Актуальність та постановка проблеми.** По своїй фізичній структурі полум'я можна розглядати як складну багатокомпонентну дисперсну систему, яка складається із газоподібної і твердої фаз. При спалюванні вуглеводних газів тверду дисперсну фазу струменя пальника формують частинки сажового вуглецю. При вимірюванні потоку випромінювання твердих частинок сажового вуглецю необхідно знати умови переносу енергії випромінювання у струмені. В основному умови переносу енергії випромінювання у струмені визначають радіаційні властивості твердих частинок, їх розсіювальна та поглинальна здатність.

**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** У роботі [1] досліджено радіаційні характеристики частинок, які формують тверду дисперсну фазу полум'я у топках парових котлів при спалюванні паливних газів з повітрям.

У роботі [2] досліджено випромінювання полум'я газового пальника, яке складається з наступних складових: власного випромінювання атомів та молекул у дискретних областях спектру; суцільного спектру власного випромінювання твердих частинок; розсіяного молекулами, атомами та твердими частинками випромінювання всіх частин полум'я. У роботі визначено спектри випромінювання складових дисперсної системи.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Не досліджено радіаційні властивості частинок сажового вуглецю

високотемпературного двофазного струменя газового пального при спалюванні пального газу з киснем у відкритому просторі.

**Мета досліджень.** Дослідити радіаційні характеристики твердих частинок сажового вуглецю полум'я у діапазоні вимірювання потоку випромінювання твердих частинок високотемпературного струменя газ-тверді частинки, а саме в інтервалі довжин хвиль 0,5...1,1 мкм.

**Основна частина.** Радіаційні властивості твердої дисперсної фази полум'я характеризуються факторами  $K_\lambda^a$  і коефіцієнтами  $\alpha_\lambda$  поглинання, а також факторами  $K_\lambda^s$  і коефіцієнтами  $\beta_\lambda$  розсіювання. Фактори поглинання і розсіювання  $K_\lambda^a$  і  $K_\lambda^s$  характеризують радіаційні властивості окремих частинок, а коефіцієнти поглинання і розсіювання  $\alpha_\lambda$  і  $\beta_\lambda$  – радіаційні властивості системи частинок. Радіаційні характеристики частинок, що утворюють тверду дисперсну фазу полум'я, містять у собі коефіцієнти поглинання, розсіювання та індикатрису розсіювання і можуть бути визначені у залежності від двох основних параметрів: параметра дифракції  $\rho$  та комплексного показника заломлення  $m$ .

Розрахунок факторів розсіювання та ослаблення визначають за формулами:

$$K_\lambda^s = \frac{2}{\rho^2} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{n^2(1+n)^2}{1+2n} \left( |a_n|^2 + |b_n|^2 \right); \quad (1)$$

$$K_\lambda = K_\lambda^a + K_\lambda^s = -\frac{2}{\rho^2} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^{\infty} i(-1)^n n(1+n)(a_n - b_n), \quad (2)$$

де  $K_\lambda^s$  – фактор розсіювання;  $K_\lambda$  – фактор ослаблення;  $K_\lambda^a$  – фактор поглинання;  $\rho$  – параметр дифракції;  $n$  – показник заломлення визначають як відношення швидкості поширення світла у вакуумі до швидкості його поширення у даному середовищі;  $a_n$  – амплітудний коефіцієнт парціальних хвиль електричних коливань;  $b_n$  – амплітудний коефіцієнт парціальних хвиль магнітних коливань [1].

Коефіцієнти  $a_n$  і  $b_n$  називаються коефіцієнтами Мі, в свою чергу є складними функціями величин  $\rho$  та  $m$ :  $a_n = a_n(m, \rho)$ ;  $b_n = b_n(m, \rho)$ . Коефіцієнти  $a_n$  і  $b_n$  виражені через функції Рікатті-Бесселя і представлені у виді:

$$a_n = \frac{\psi_n(\rho) \left[ \frac{\psi'_n(m\rho)}{\psi_n(m\rho)} \right] - m\psi'_n(\rho)}{\xi_n(\rho) \left[ \frac{\psi'_n(m\rho)}{\psi_n(m\rho)} \right] - m\xi'_n(\rho)}; \quad (3)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(\rho) \left[ \frac{\psi'_n(m\rho)}{\psi_n(m\rho)} \right] - \psi'_n(\rho)}{m\xi_n(\rho) \left[ \frac{\psi'_n(m\rho)}{\psi_n(m\rho)} \right] - \xi'_n(\rho)}, \quad (4)$$

де  $m$  – комплексний показник заломлення;  $\psi_n(z)$ ,  $\xi_n(z)$  – функції Рікатті-Бесселя;  $z \equiv \rho$  або  $m\rho$  [2]. Функції Рікатті-Бесселя  $\psi_n(z)$  і  $\xi_n(z)$  зв'язані з функцією Бесселя нецілого порядку співвідношеннями

$$\psi_n(z) = \left( \frac{\pi z}{2} \right)^{\frac{1}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z); \quad (5)$$

$$\xi_n(z) = \left( \frac{\pi z}{2} \right)^{\frac{1}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z) + (-1)^n i J_{-n-\frac{1}{2}}(z), \quad i = \sqrt{-1}. \quad (6)$$

Коли показник заломлення  $m$  – комплексна величина, функцію  $\psi'_n(m\rho)/\psi_n(m\rho)$  виражено через функції Бесселя від комплексного аргументу. Величини  $K_\lambda^s$  і  $K_\lambda$  виражаються у виді нескінченних рядів. Число членів у розкладаннях, які необхідно враховувати при розрахунках, залежать від значення параметра  $\rho$  та по порядку величини близько до значення  $\rho$ .

Вимірювання потоку випромінювання виконано в інтервалі довжин електромагнітних хвиль від 0,5 до 1,1 мкм. Експериментальні дані показують, що для полум'я в умовах утворення частинок сажі з газової фази вуглеводнів розмір частинок змінюється від 5 до 80 нм. Дисперсія оптичних констант сажі в області довжин хвиль від 1 до 6 мкм описана залежністю виду

$$n(\lambda) = 1,6 + 0,3\lambda; \quad (7)$$



$$\chi(\lambda) = b\lambda^{0,6}, \quad (8)$$

де  $b = 1 \text{ мкм}^{-0,6}$  – числовий коефіцієнт [1].

Параметр дифракції визначено за формулою

$$\rho = \pi \cdot \frac{d}{\lambda}, \quad (9)$$

де  $d$  – діаметр твердої частинки;  $\lambda$  – довжина хвилі падаючого випромінювання у навколишній середовищі [1], а комплексний показник заломлення визначено за формулою

$$m = n - i \cdot \chi, \quad (10)$$

де  $i\chi$  – характеризує згасання амплітуди електромагнітних коливань у речовині, обумовлене поглинанням (табл. 1).

Таблиця 1

**Оптичні константи сажі в діапазоні вимірювання**

Показник	Значення показника при довжині хвилі $\lambda$ та діаметрі твердої частинки $d$			
	$\lambda = 0,5 \text{ мкм}$		$\lambda = 1,1 \text{ мкм}$	
	$d = 5 \text{ нм}$	$d = 80 \text{ нм}$	$d = 5 \text{ нм}$	$d = 80 \text{ нм}$
Показник заломлення, $n$	1,75	1,75	1,93	1,93
Величина $\chi$	0,66	0,66	1,059	1,059
Комплексний показник заломлення, $m$	1,75-0,66 <i>i</i>	1,75-0,66 <i>i</i>	1,93-1,059 <i>i</i>	1,93-1,059 <i>i</i>
Параметр дифракції, $\rho$	0,031	0,503	0,014	0,228
$ m \rho$	0,059	0,94	0,031	0,503

Так як  $\rho \ll 1$ , а  $|m|\rho < 1$ , то відповідно до теорії Мі тверді частинки сажового вуглецю, що знаходяться у високотемпературному струмені газового пальника, є малими частинками. При цьому у приведених вище залежностях можна обмежитися лише однією парціальною хвилею електричних коливань з амплітудою

$$a_n = \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^3 \cdot \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1}. \quad (11)$$

Всі наступні амплітудні коефіцієнти електричних і магнітних коливань дуже малі у порівнянні з величиною  $a_n$ . Тоді для частинок малих розмірів

$$K_\lambda^s = \frac{8}{3} \rho^{-2} |a_1|^2 = \frac{8}{3} \rho^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2; \quad (12)$$

$$K_\lambda = -2\rho^{-2} \operatorname{Re}(-2ia_1) = -4\rho \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right). \quad (13)$$

Так як фактор розсіювання  $K_\lambda^s$  – змінюється пропорційно величині  $\rho^4$ , то при достатньо невеликих значеннях  $\rho$  величина  $K_\lambda^s$  незначна у порівнянні з величиною  $K_\lambda$ . Тоді з рівняння (2)  $K_\lambda = K_\lambda^a + K_\lambda^s$  визначено

$$K_\lambda^a = 4\rho \operatorname{Im} \left( \frac{1 - m^2}{m^2 + 2} \right). \quad (14)$$

Фактори  $K_\lambda$ ,  $K_\lambda^a$ ,  $K_\lambda^s$  є безрозмірними величинами (табл. 2).

Позначимо

$$M(\lambda) = \frac{8\pi^4}{3} \left| \frac{m-1}{m^2+2} \right|^2. \quad (15)$$

Тоді рівняння (12) приймає вид

$$K_\lambda^s = \frac{M(\lambda) \cdot x^4}{\lambda^4}. \quad (16)$$

Формула (16) являє собою відомий закон розсіювання Релея, відповідно якому для частинок малих розмірів інтенсивність розсіювання обернено пропорційна четвертій степені довжини хвилі падаючого випромінювання.

Таблиця 2

**Радіаційні характеристики твердих частинок вуглецю полум'я**

Показник	Значення показника при довжині хвилі $\lambda$ та діаметрі твердої частинки $d$			
	$\lambda = 0,5$ мкм		$\lambda = 1,1$ мкм	
	$d = 5$ нм	$D = 80$ нм	$d = 5$ нм	$d = 80$ нм
Фактор поглинання $K_{\lambda}^a$	-0,033 - 0,06i	-0,521 - 0,967i	-0,018 - 0,36i	-0,296 - 0,581i
Фактор розсіювання $K_{\lambda}^s$	$7,75 \cdot 10^{-7}$	$5,08 \cdot 10^{-2}$	$5,64 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Фактор ослаблення $K_{\lambda}$	-0,033 - 0,06i	-0,521 - 0,967i	-0,018 - 0,36i	-0,296 - 0,581i
Коефіцієнт асиметрії $\eta_{\text{вп/вз}}$	1	1	1	1

Розподіл розсіяного світла по різних напрямкам  $\theta$  характеризується індикатрисою розсіювання, яку визначено за формулою

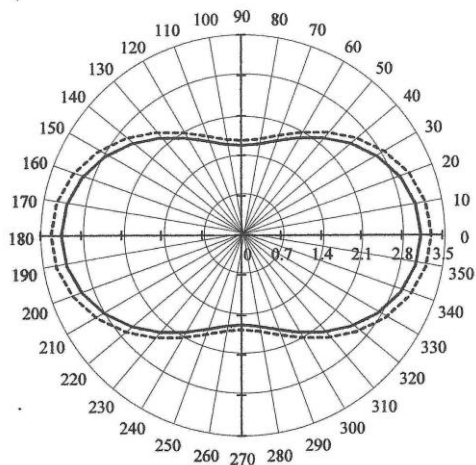
$$\gamma_{\lambda}(\theta) = \frac{2\rho^4}{K_{\lambda}^s} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right| (1 + \cos^2 \theta), \quad (17)$$

де  $\theta$  – кут напрямку випромінювання [1].

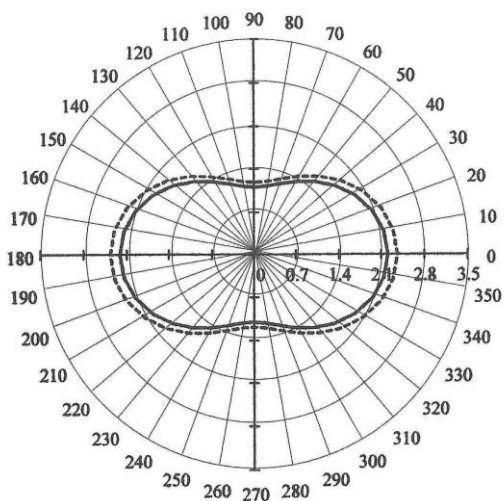
Для частинок сажового вуглецю розміром від 5 до 80 нм характерною є симетрична «вперед-назад» індикатриса розсіювання. Максимальне розсіювання спостерігається у напрямку  $\theta = 180^\circ$  і  $\theta = 0$  «вперед-назад» (рис. 1).

Коефіцієнт асиметрії індикатриса розсіювання випромінювання визначено за формулою

$$\eta_{\text{вп/вз}} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \gamma_{\lambda}(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \gamma_{\lambda}(\theta) \sin \theta d\theta}. \quad (18)$$



*a)*



*б)*

Рис. 1. Індикатриси розсіювання для частинок сажевого вуглецю:  
*a* – при довжині хвилі 0,5 мкм; *б* – при довжині хвилі 1,1 мкм;  
 ———— розмір частинок сажевого вуглецю 5 нм;  
 - - - - - розмір частинок сажевого вуглецю 80 нм

**Висновки.** Як видно з формули (17) для всіх частинок малих розмірів ( $\rho \ll 1$ ) вид індикатриси розсіювання один і той же і не залежить від конкретного значення параметра  $\rho$ . Зміна довжини хвилі випромінювання при цьому також не впливає на характер індикатриси розсіювання. Змінюється тільки сумарна кількість енергії, розсіяної частинкою по всіх напрямках.

З формул (12) та (13) видно, що для частинок сажового вуглецю полум'я фактор ослаблення  $K_\lambda$  змінюється пропорційно величині  $\rho$ , а фактор розсіювання  $K_\lambda^s$  – пропорційно величині  $\rho^4$ .

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Блох А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А. Г. Блох. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1984. – 240 с.
2. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай / Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2006. – № 4. – С. 69–76.
3. Оцисик М. Н. Сложный теплообмен / М. Н. Оцисик. – пер. с англ.; под ред. д-ра техн. наук Н. А. Анфилова. – М.: Мир, 1976. – 616 с.

*Опубліковано в збірнику наукових праць  
«Процеси механічної обробки в машинобудуванні»  
Житомир : ЖДТУ, 2011. – №11. – С. 185–194.*

УДК 621.317.39.084.2

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ВИТРАТ КИСНЮ ПАЛЬНИКА

В.М. Ночвай

*В роботі виконано аналіз технологічних особливостей методу контролю витрат кисню газового пальника.*

**Актуальність та постановка проблеми.** Підвищення надійності та довговічності сучасних машин та обладнання є важливою задачею машинобудування. Одним із шляхів розв'язання цієї задачі є застосування

газотермічних покриттів.

Фізико-механічні властивості газотермічних покриттів у значній мірі залежать від технологічних режимів їх напилювання, у тому числі від стехіометричного співвідношення кисень-пальний газ у пальної суміші, яке визначає тип полум'я пальника. Для якісного проведення технологічних процесів газополуменевої обробки матеріалів необхідно підтримувати певне співвідношення кисню та пального газу, причому для різних матеріалів, що обробляються, це співвідношення повинно знаходитися у різних межах [1].

При виконанні технологічного процесу нанесення покриттів газополуменим методом використовують різні моделі установок, апаратів та пальників для газополуменевого напилювання [2]. При виконанні газового зварювання та різання металів використовують різноманітні моделі пальників та різаків, а також різні типи пальних газів [3–5]. Тому дослідження технологічних особливостей методу контролю витрат кисню газового пальника є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** У роботі [6] досліджено випромінювання полум'я газового пальника, а у роботі [7] розроблено спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я розроблено та досліджено у роботі [8], а дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок, які знаходяться у високотемпературному газовому струмені газового пальника, досліджено у роботі [9].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Не досліджено технологічні особливості методу контролю витрат кисню газового пальника при використанні різних пальників: по способу подачі пального газу і окислювача; по типу пального газу; по призначенню; по потужності полум'я.

**Мета досліджень.** Виявити та виконати аналіз технологічних особливостей методу контролю витрат кисню газового пальника.

**Основна частина.** Технологічний процес формування полум'я газового пальника характеризують значення вхідних параметрів (витрати кисню, витрати та тип пального газу) та значення вихідного параметра (потік випромінювання частинок сажового вуглецю).

При виконанні досліджень застосовано: установки для газополуменевого напилювання покриттів (Л-5405А, УГПТ, УГПТ-П); апарати для газополуменевого напилювання покриттів (021-4-01 «Ремдеталь», ГАЛ-6-73); пальники для газополуменевого напилювання

покриттів (ГН-2, ГН-3); пальники для газового зварювання та паяння металів (безінжекторний ГС-1, інжекторний малої потужності Г-2-02, інжекторний середньої потужності Г-3-02); різачи для кисневого різання металів Р2А-01(для різання з застосуванням ацетилену) та РЗР-62 (для різання з застосуванням газів-замінників ацетилену). При виконанні дослідів застосовано наступні робочі гази: окислювач – кисень; пальні гази – ацетилен, пропан-бутан, МАПП (метилацетилен-пропадиєн), водень. При проведенні досліджень методу контролю витрат кисню застосовано установку, показаний на рис. 1.

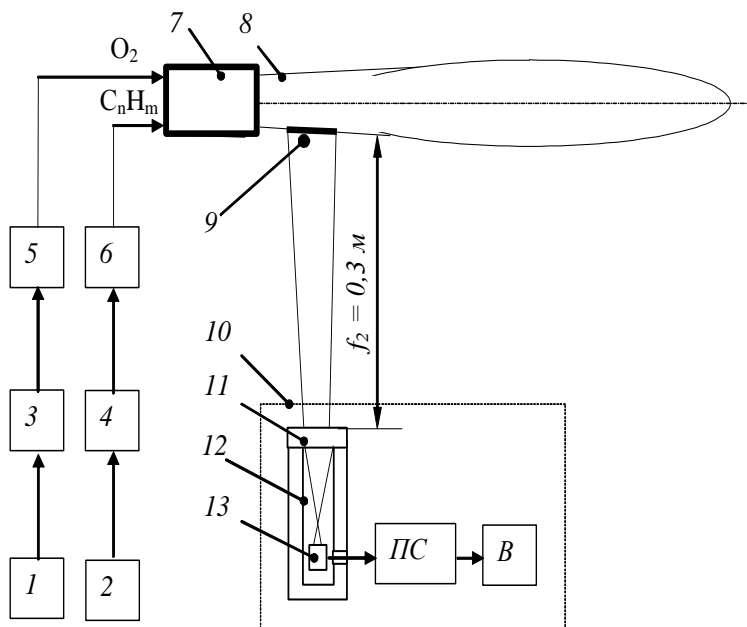


Рис. 1. Схема установки вимірювання потоку випромінювання сажового вуглецю полум'я:

- 1, 2 – балони кисневий та з палим газом; 3, 4 – редуктори балонні;  
 5, 6 – ротаметри; 7 – пальник; 8 – полум'я; 9 – майданчик візування;  
 10 – ОЕП; 11 – об'єktiv; 12 – давач ОЕП; 13 – приймач  
 випромінювання;  $f_2$  – відстань від об'єктива до майданчика візування;  
 ПС – підсилювач сигналу; В – вольтметр

Тиск кисню, тиск та витрати пального газу прийнято незмінними та встановлено на необхідному рівні з заданою точністю відповідно з технічними характеристиками газового пальника. Змінним фактором прийнято витрати кисню.

При запалюванні пальника подають мінімальну кількість кисню, а у наступних дослідах витрати кисню збільшують дискретно з кроком  $h = 0,5$  л/хв. При цьому виконують вимірювання витрат газів за допомогою ротаметрів та напруги на виході оптико-електронного приладу (ОЕП). Вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю виконано з використанням ОЕП. Діапазоном вимірювання потоку випромінювання твердих частинок вибрано ділянку, яка знаходиться в області спектру електромагнітних хвиль  $0,5 \dots 1,1$  мкм.

**Перша** особливість методу контролю витрат кисню пальників полягає в наступному. При виконанні контролю витрат кисню  $V_{кк}$ , які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші пальника, і при незмінних витратах пального газу витрати кисню збільшують з кроком  $h$  і визначають шукане значення витрат кисню за спадом до нуля потоку випромінювання сажового вуглецю (рис. 2 та 3).

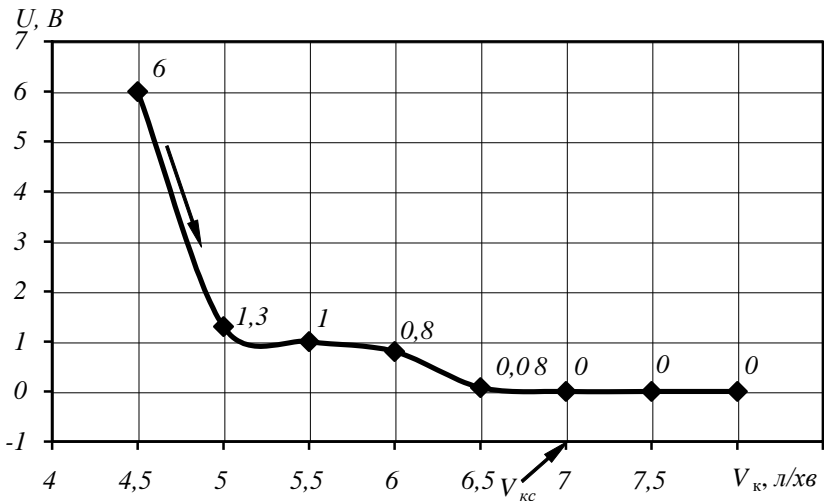


Рис. 2. Залежність напруги на виході ОЕП від витрат кисню (витрати ацетилену 6,6 л/хв)



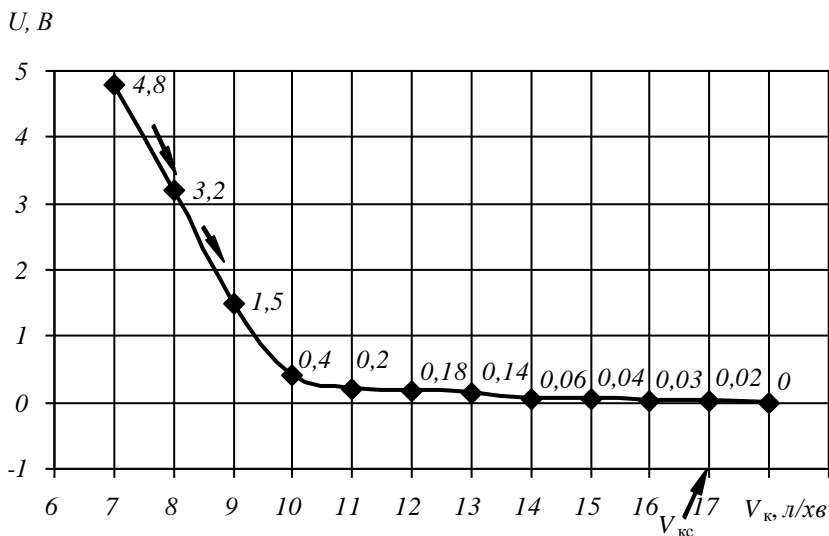


Рис. 3. Залежність напруги на виході ОЕП від витрат кисню (витрати пропан-бутану 6 л/хв)

При цьому регулювання витрат кисню виконують за допомогою вентиля на ротаметрі. Після закінчення виконання операцій вимірального контролю отримують нормальний (нейтральний) тип полум'я і можна отримати чисельне значення витрат кисню  $V_{кc}$  шляхом зняття показів ротаметра в умовних одиницях і визначення витрат кисню у літрах за хвилину по тарифовочному графіку ротаметра.

**Друга** особливість методу полягає у тому, що при відсутності приладів вимірювання витрат газів (ротаметрів) на посту газополуменевої обробки витрати кисню збільшують плавно за допомогою вентиля на газовому пальнику. У цьому випадку встановлене шляхом регулювання значення витрат кисню  $V_{кc}$ , яке відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші пальника, залишається невідомою величиною.

**Третя** особливість методу. Так як при виконанні контролю з регулюванням витрат кисню задане значення потоку випромінювання твердих частинок сажового вуглецю дорівнює нулю, то вимірювання цього потоку достатньо виконувати в умовних одиницях. Звідси, необов'язково виконувати градування шкали ОЕП в одиницях вимірювання потоку випромінювання твердих частинок, достатньо

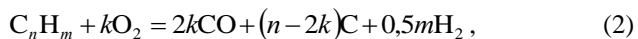
виконати градування шкали ОЕП в умовних одиницях вимірювання або використати вольтметр з градуйованою шкалою у вольтах. Ця особливість спрощує виготовлення ОЕП.

**Четверта** особливість методу. Так як значення витрат кисню  $V_{\text{кк}}$  невідоме до початку виконання контролю, а відоме значення вимірюемого параметра – напруги на виході ОЕП, яке дорівнює нулю, то прийнято нижню та верхню межі допускового інтервалу для значення параметра, що вимірюють. Так як напруга на виході ОЕП і витрати кисню знаходяться в обернено пропорційній залежності

$$U = a_1 + \frac{a_2}{V} + \frac{a_3}{V^2} + \frac{a_4}{V^3} + \frac{a_5}{V^4}, \quad (1)$$

де  $U$  – напруга на виході ОЕП;  $V$  – витрати кисню пальника;  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – параметри математичної моделі полум'я газового пальника, то верхній межі  $V_{\text{кВ}} = V_{\text{кк}}$  допускового інтервалу для значення контрольованого параметра відповідає нижня межа  $U_{\text{Н}} = 0$  В допускового інтервалу для значення вимірюваного параметра, а нижній межі  $V_{\text{кН}} = V_{\text{кк}} - 0,5$  л/хв допускового інтервалу для значення контрольованого параметра відповідає верхня межа  $U_{\text{В}} = 0,02$  В допускового інтервалу для значення вимірюваного параметра (рис. 4).

**П'ята** особливість методу полягає у тому, що при недостатчі кисню у пальній суміші при спалюванні пальних газів, хімічна формула яких вміщує атом вуглецю, перша стадія реакції горіння проходить по схемі



де  $C_nH_m$  – хімічна формула пального газу;  $k$  – кількість молекул кисню використаних у реакції горіння.

При цьому  $2k < n$ , за межами ядра полум'я знаходяться продукти горіння CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O та тверді частинки сажового вуглецю, який не згорів внаслідок недостатчі необхідної кількості кисню. А так як при виконанні контролю витрат кисню вимірюють потік випромінювання компонентів не газової складової полум'я, а твердої фази – частинок сажового вуглецю і виконують якісний аналіз вуглецю у полум'ї пальника (присутність або відсутність частинок вуглецю за межами ядра полум'я), то метод контролю витрат кисню газового пальника можна застосувати при спалюванні будь-якого типу пального газу, молекула якого вміщує атом вуглецю (ацетилен C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>, окис вуглецю CO, етан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, пропан

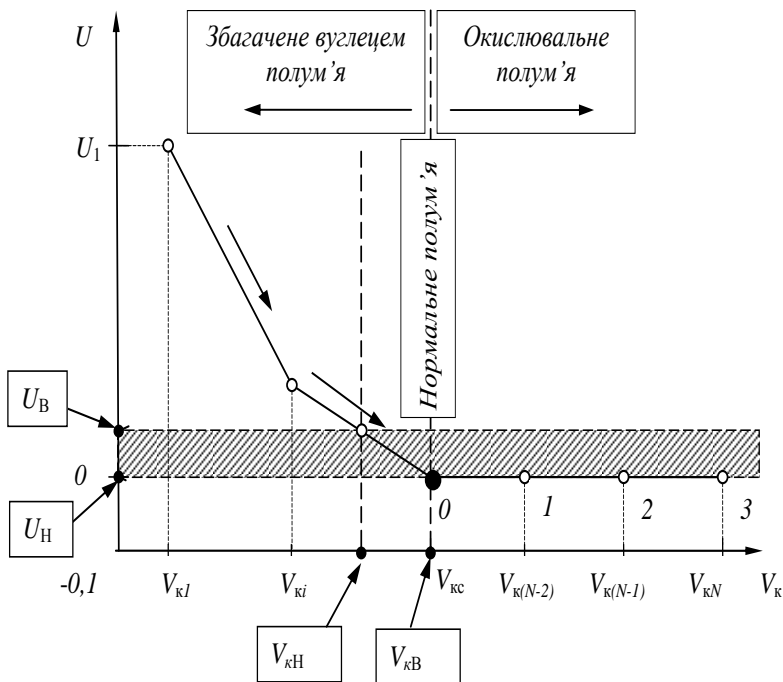


Рис. 4. Межі допускового інтервалу при виконанні активного контролю з регулюванням витрат кисню у паливній суміші пального:

$V_{кН}$ ,  $V_{кВ}$  – нижня та верхня межі допускового інтервалу для значення контрольованого параметра;  $U_H$ ,  $U_B$  – нижня та верхня межі допускового інтервалу для значення інформативного параметра

$C_3H_8$ , Н-бутан  $C_4H_{10}$ , МАПП (метилацетилен-пропадієн), коксовий, нафтовий та природний газ та інші).

**Шоста** особливість методу. Результати експериментальних досліджень підтвердили відсутність твердих частинок у полум'ї паливників при спалюванні водню з киснем, так як продуктом його горіння є вода. Тому застосувати розроблений метод контролю витрат кисню при використанні водню неможливо.

**Сьома** особливість методу. Приймаючи до уваги габарити, масу та автономне джерело живлення ОЕП (табл. 1), то застосовувати метод та засіб контролю можна при виконанні газополумєневих робіт у науково-дослідних організаціях, у навчальних закладах, у виробничих

## Основні технічні характеристики ОЕП

№ п.п.	Параметр	Значення параметра
1.	Робочий діапазон спектру, мкм	0,5...1,1
2.	Тип приймача випромінювання	ФД-25К
3.	Відстань від лінзи об'єктива до об'єкта вимірювання, мм	300
4.	Діаметр майданчика візування, мм	5
5.	Діапазон вимірювання напруги на виході підсилювача сигналу, В	0...7,2
6.	Напруга джерела живлення, В	$\pm 9$
7.	Габарити перетворювача потік випромінювання-електричний сигнал: – діаметр, мм – довжина, мм	35 120
8.	Габарити електронного блоку, мм	88×58×31
9.	Маса приладу (без джерела живлення), кг	0,27

підприємствах різних галузей народного господарства, як в цехових, так і у польових умовах виконання робіт.

**Восьма** особливість методу полягає у тому, що операції вимірювального контролю витрат кисню пальника прості і не потребують високого рівня кваліфікації оператора (рис. 5).

**Дев'ята** особливість методу полягає у тому, що контроль витрат кисню  $V_{кв}$ , які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші пальника, можна виконувати при використанні:

а) різних типів апаратів газополуменевого напилювання покриттів (по способу подачі матеріалу напилювання у високотемпературний струмінь, по потужності полум'я, по продуктивності напилювання матеріалу покриття, по способу застосування – ручних та стаціонарних);

б) різних пальників: по способу подачі пального газу і окислювача (інжекторні та безінжекторні), по типу пального газу (ацетиленові та для газів-замінників ацетилену), по призначенню – універсальні (зварювання, різання, паяння, напилювання, наплавлення) та спеціалізовані, по кількості струменів (одноструменеві і багатоструменеві), по потужності полум'я, по способу застосування (ручні і машинні).

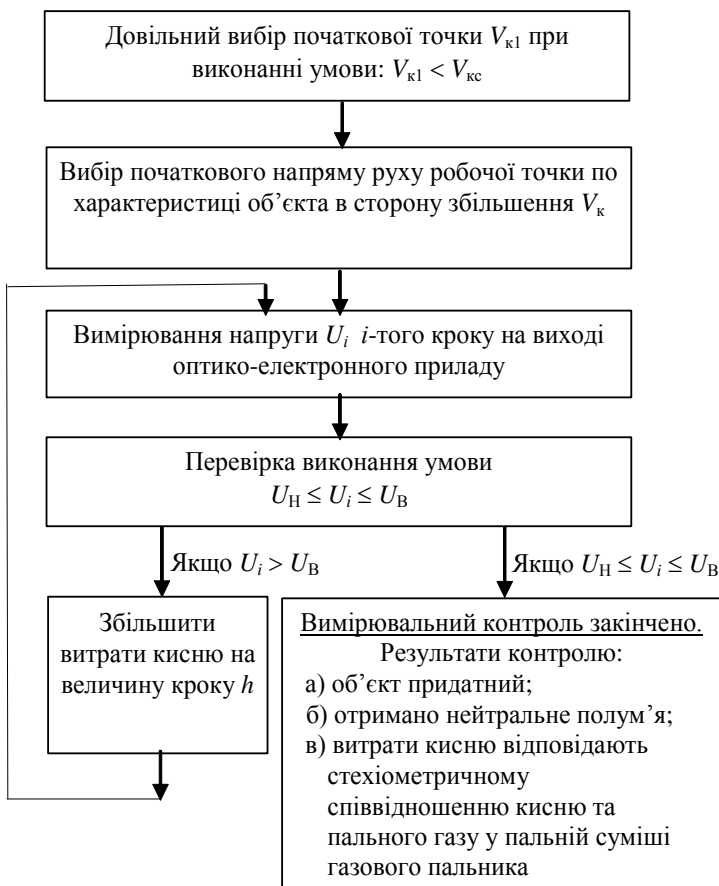


Рис. 5. Схема виконання операцій вимірювального контролю

## Висновки

Контроль витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші газового пальника, можна виконати при використанні будь-якого пального газу, молекула якого вміщує атом вуглецю. Застосувати розроблений метод контролю витрат кисню при використанні водню неможливо.

Метод та засіб контролю витрат кисню можна застосувати при використанні різних установок, апаратів та пальників для газополуменевого напилювання покриттів, пальників для газового зварювання та паяння металів, інших пристроїв для спалювання вуглеводних газів з киснем незалежно від конструкції, потужності та призначення.

Метод та засіб контролю можна застосувати при виконанні газополуменевої обробки металів у цехових і польових умовах виконання робіт, операції вимірювального контролю витрат кисню пальника прості і не потребують високого рівня кваліфікації оператора.

### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Ольшанский Н. А. Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. / Н. А. Ольшанский. – М. : Машиностроение, 1978-1979.
2. РТМ 3-90. Газотермическое напыление покрытий : сб. рук. техн. матер. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. – 176 с.
3. Соколов И. И. Газовая сварка и резка металлов : учеб. пособ. / И. И. Соколов. – 2-е изд., перераб и доп. – М. : Высш. шк., 1981. – 320 с.
4. Справочник сварщика / Под ред. В. В. Степанова. – М. : Машиностроение, 1983. – 560 с., ил.
5. Нинбург А. К. Газопламенная обработка металлов с использованием газов-заменителей ацетилена / А. К. Нинбург. – М. : Машиностроение, 1976. – 152 с.
6. Ночвай В.М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць ЖДТУ. – 2006. – № 4. – С. 69-76.
7. Пат. 76332 Україна, МПК F23N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041008025 ; заявл. 04.10.04 ; опубл. 17.07.06, Бюл. № 7.
8. Ночвай В.М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 6. – С. 30–40.
9. Ночвай В. М. Дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок / В. М. Ночвай, В. Г. Петрук // Вісник ЖДТУ. – 2008. – № 4. – С. 43–48.

*Опубліковано в збірнику наукових статей  
III-го Всеукраїнського з'їзду екологів з  
міжнародною участю. Том 2.  
21-24 вересня 2011 р.  
Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 400–402.*

УДК 621.7.08: 531.733

## **ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТА ТЕХНОЛОГІЯ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА**

В.М. Ночвай, В.Г. Петрук

**Актуальність та постановка проблеми.** Розвиток науки, техніки і промисловості, впровадження нових технологічних процесів приводить до все більшого забруднення довкілля, яке прийняло тотальний характер. Це вже привело до того, що екологічна рівновага у ряді районів нашої планети знаходиться під загрозою.

Сучасна енергетика використовує в основному викопне паливо (різні види вугілля, нафта і природний газ) [1]. В даний час понад 85 % всієї енергії виробляється за рахунок викопного палива [2], а за даними роботи [3] – близько 95 %. Зростаючий ріст видобутку палив несе із собою багаточисельні і часто невіршувані проблеми забруднення довкілля. При спалюванні викопних палив утворюється безліч різних забруднень [1].

У складі газопилевих викидів теплоелектростанцій в атмосферу пилових і газоподібних відходів, що утворюються при спалюванні палива, знаходяться оксиди сірки і азоту, зола, сажа, незгорілі дрібні частки палива, диоксин, чадний газ, вуглекислий газ, інші речовини. У складі газопилевих викидів теплоелектростанцій завжди присутні радіонукліди (уран-235, радій-210, 226, 228, торій-235, калій-40 і ін.) [4]. Значні по масштабу втрати природі наносять оксиди сірки й азоту, що викидаються теплоелектростанціями і численними котельнями. При контакті з водяною парою атмосфери і аерозолями ці оксиди утворюють відповідно сірчану й азотні кислоти, що у виді часток діаметром 0,1...1,0 мкм знаходяться в повітрі і хмарах [4].

З урахуванням усіх витрат і втрат при видобутку, транспортуванні, збереженні, спалюванні енергоносія до споживача у виді електроенергії доходить всього 10 %, або з 1000 МДж енергії, яка знаходиться у вугільному шарі, споживач отримує тільки 100 МДж. При використанні нафти або газу цей показник істотно вищий [4].

"Тиск" сучасного виробництва на середовище проявляється в найрізноманітніших формах, однак всі аспекти негативного впливу на природу можна звести до двох головних: виснаження природних ресурсів і погіршення екологічних умов життя людей [1].

Крім того, по міжнародним оцінкам загальні запаси природного палива складають приблизно 12800 млрд тон умовного палива [4], які є обмеженою величиною. А так як нагромадження викопного палива в земній корі відбувалося 300-600 млн. років тому, причому вік більшості шарів кам'яного вугілля оцінюється в 300-350 млн. років, а передбачуваний вік родовищ природного газу складає 500-600 млн. років [1], то для формування нових родовищ палива в земній корі необхідний відповідний період часу.

Отже, пошук відновлювальних видів палива та розроблення екологічно чистої технології його спалювання, яка не приводить до забруднення довкілля є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** Сучасні газоочишувальні установки, які впроваджують у всьому світі, дозволяють уловлювати до 95 % золи, на наших вітчизняних теплових станціях – до 70 % [4].

В роботі [9] розроблено та досліджено метод контролю витрат кисню за потоком випромінювання полум'я газового пальника, який забезпечує повне згорання горючого газу та окислювача без залишку.

**Мета досліджень.** Пошук відновлювальних видів палива та розроблення екологічно чистої технології його спалювання, яка не приводить до забруднення довкілля.

**Основна частина.** Для того, щоб продвинути вперед у вирішенні проблеми необхідно повернутися в минуле. Представники староіндійського матеріалізму вважали, що першоосною світу є чотири елементи: земля, вода, вогонь і повітря [5]. Слідом за Фалесом на шляхах пошуку загального початку філософи обґрунтовують, то повітря (Анаксімен), то безякісний і безмежний початок – апейрон (Анаксимандр), то вогонь (Геракліт), то дрібні неподільні частки речовини – атоми (Демокріт), то сукупність чотирьох стихій – вогню, повітря, води і землі (Емпедокл) [6].

Розглянемо існуючу технологію спалювання палива і основні процеси, що протікають в сукупності чотирьох стихій – вогню, повітря, води і землі. При спалюванні палива протікає хімічна реакція окислення матеріалу з одночасним виділенням теплової енергії. Окислювачем є кисень повітря, вміст якого в повітрі складає 21 % [7]. При цьому в



полум'я разом з киснем надходять інші гази, що входять до складу повітря – азот, аргон, неон, гелій, криптон, ксенон, радон, водень. При спалюванні палива в атмосферу викидаються оксиди сірки і азоту, зола, незгорілі дрібні частки палива, диоксин, чадний газ, вуглекислий газ, вода та інші речовини. Наряду з виснаженням природних ресурсів утворюється безліч різних забруднень навколишнього середовища.

Таким чином, в процесі спалювання викопного палива приймають участь чотири стихії: вогонь, повітря, вода і земля. Водночас вони є представниками чотирьох видів фазового стану речовини. Схема існуючого в енергетиці процесу спалювання викопного палива є розімкнутою (земля-вогнє-повітря-вода), так як відсутній процес відновлення палива з його продуктів згорання (рис. 1).

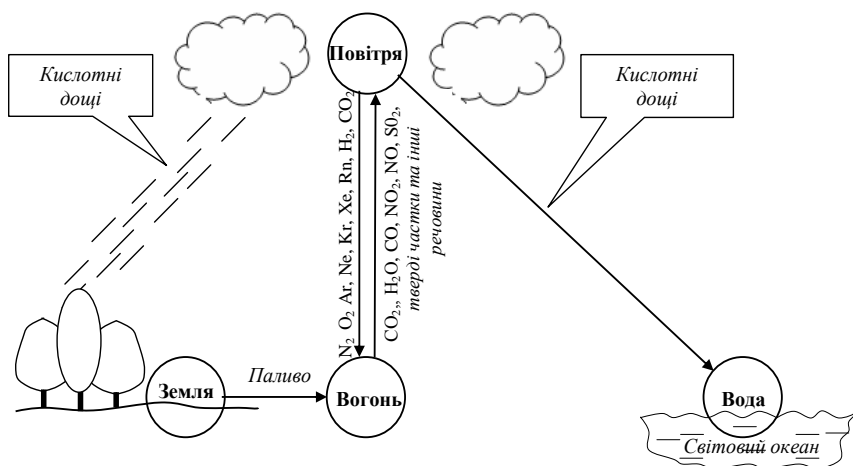


Рис. 1. Схема існуючого процесу спалювання викопного палива з участю чотирьох стихій

Необхідно вирішити проблему пошуку відновлювальних видів палива та розроблення технології його спалювання, яка не приводить до забруднення довкілля.

Розглянемо таку стихію, як вода. У воді є водень (паливо) і кисень (окислювач). При спалюванні водню утворюється тільки вода, яку можна знову розкласти на водень і кисень, причому цей процес не викликає

ніякого забруднення навколишнього середовища. Водневе полум'я не виділяє в атмосферу продуктів, якими неминуче супроводжується горіння будь-яких інших видів палива, вуглекислого газу, окису вуглецю, сірчистого газу, вуглеводнів, золи, органічних перекисів і т.п. [1]. Так як водень є відновлювальним видом палива, то схема процесу спалювання водню з киснем буде замкнутою (вогонь-повітря-вода-вогонь) (рис. 2).

Крім того, водень має дуже високу теплотворну здатність: при спалюванні 1 г водню отримують 120 Дж теплової енергії, а при спалюванні 1 г бензину – тільки 47 Дж [1].

Водень – синтетичне паливо. Його можна отримати із вугілля, нафти, природного газу або шляхом розкладання води. Водень виробляють головним чином (80 %) з нафти. Але це неекономічний процес, тому що енергія, отримана з такого водню, обходиться в 3,5 рази дорожче, ніж енергія від спалювання бензину. До того ж собівартість такого водню постійно зростає в міру підвищення цін на нафту [1].

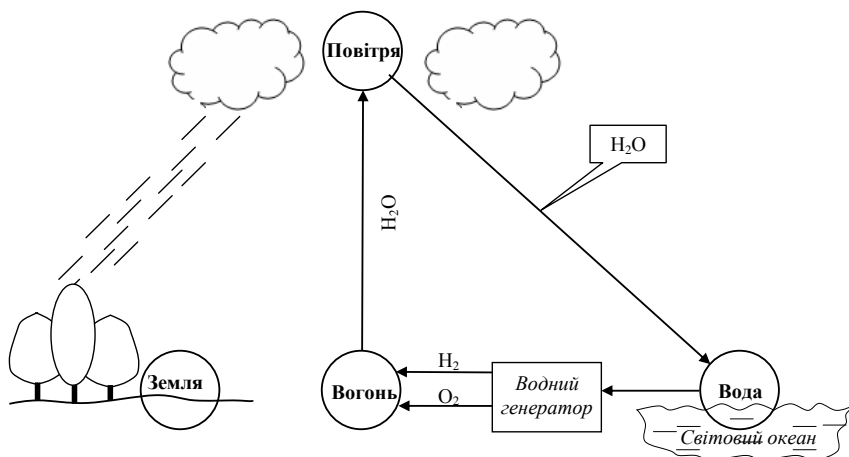


Рис. 2. Схема процесу спалювання водню з киснем з участю трьох стихій

Водень, найпростіший і легкий із усіх хімічних елементів, можна вважати ідеальним паливом. Він є скрізь, де є вода. Ідеальною сировиною для промислового виробництва водню є вода, запаси якої у вільному стані на земній кулі величезні. Морська вода найпоширеніша на поверхні Землі речовина. З усієї маси вільної води на Землі в Світовому океані зосереджено від 93,9% до 98,3% (за різними підрахунками) [8] (табл. 1).

Запаси води на земній кулі [8]

Сховище води	Об'єм в тис. куб. км	Сховище води	Об'єм в тис. куб. км
Світовий океан	1 370 000	Грунтова волога	82
Підземні води	60 000	Пара в атмосфері	14
Льодовики	24 000	Річкові води	1,2
Озера	230		

Морська вода – це стійкі хімічні сполуки водню (1,19 %) з киснем (88,81 %). Світовий океан – основне сховище цих елементів на нашій планеті. У 1 т води міститься 859,37 кг кисню та 108,02 кг водню. Запаси Світового океану складають  $1,2 \cdot 10^{18}$  т кисню та  $1,5 \cdot 10^{17}$  т водню [8].

Виробництво водню методом електролізу води обходиться дорожче, ніж вироблення його з нафти, але воно буде розширюватися і з розвитком атомної енергетики стане дешевше [1].

Вітчизняна промисловість виготовляє електролізно-водневий генератор моделі А-1803, в якому за рахунок електролізу води на виході отримують воднево-кисневу суміш. При проведенні експериментально-дослідних робіт встановлено, що генератор є універсальним джерелом газополуменевої обробки з температурою полум'я 2700 – 3000 °С. Експериментально-дослідні роботи проводили при виконанні наступних технологічних процесів: газового зварювання, різання та пайки металів, термообробки, напилювання металопокриттів.

Велику увагу приділяють термолітичному методу, що (у перспективі) полягає в розкладанні води на водень і кисень при температурі 2500 °С. Але таку температурну межу інженери ще не освоїли у великих технологічних агрегатах, у тому числі і працюючих на атомній енергії (у високотемпературних реакторах поки розраховують лише на температуру близько 1000 °С) [1].

Введена в експлуатацію установка для термолітичного отримання водню, що працює з к.к.д. 55 % при температурі 730 °С. Вважають, що високотемпературні реактори дозволять підняти к.к.д. таких процесів до 85 % [1].

Порівнюючи к.к.д. способів отримання водню з води, необхідно зауважити, що і к.к.д. теплових електростанцій відносно низький. У сучасних електростанціях на органічному паливі він складає близько 40 %, а у атомних електростанціях 33 % [1].

## Висновки

Водень є екологічно чистим паливом, так як, при його спалюванні з киснем утворюється тільки вода, а водневе полум'я не виділяє в атмосферу продуктів, які забруднюють довкілля.

Водень є відновлювальним видом палива, так як продукт згорання водню з киснем (воду) можна знову розкласти на водень і кисень.

Технологія розкладання води на водень і кисень не викликає ніякого забруднення навколишнього середовища.

Якщо врахувати, що ціни всіх сучасних видів енергії виявляють тенденцію до зростання, то можна припустити, що в довгостроковій перспективі енергія у формі водню буде обходитися дешевше, ніж у формі природного газу, а можливо, і у формі електричного струму.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Тельдеші Ю. Мир ищет энергию / Ю. Тельдеші, Ю. Лесны ; пер. М.Я. Аркина; под ред. Ю.А. Мазитова. – М. : Мир, 1981. – 439 с., ил.
2. Примак А. В. Ключи к чистому воздуху / А. В. Примак, А. Н. Щербань. – К. : Наукова думка, 1986. – 127 с.
3. Лебединський Ю. П. Ресурсосбережение и экология / Ю. П. Лебединский, Ю. В. Склянкин, П. И. Попов. – К. : Политиздат Украины, 1990. – 223 с.
4. Алексеенко И. Р. Последняя цивилизация? Человек. Общество. Природа / И. Р. Алексеенко, Л. В. Кейсевич. – К. : Наукова думка, 1997. – 412 с.
5. Спиркин А. Г. Основы философии : учеб. пособие для вузов / А. Г. Спиркин. – М. : Политиздат, 1988. – 592 с.
6. Філософія : навч. посіб. для студентів вузів / Авторський колектив під керівництвом д-ра філ. наук, проф. В. С. Зубова. – К. : Фірма «Фіта», 1994. – 384 с.
7. Казанцев Е. И. Промышленные печи : [справоч. рук. для расч. и проектир.] / Е. И. Казанцев. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.
8. Осокін С. Д. Світовий океан. Нариси про природу і економіку : посібник для вчителів / С. Д. Осокін. – К : Радянська школа, 1975. – 216 с.
9. Ночвай В. М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 6. – С. 30–40.

УДК 621.317.39.084.2

## МЕТОД КОНТРОЛЮ ВИТРАТ КИСНЮ ПАЛЬНИКІВ ПО ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОЛУМ'Я ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРОПАН- БУТАНУ

В.М. Ночвай

*В роботі теоретично обґрунтовано, розроблено та досліджено метод контролю витрат кисню газового пальника по потоку випромінювання полум'я при спалюванні пропан-бутану.*

**Актуальність та постановка проблеми.** Для якісного проведення технологічних процесів газополуменевої обробки матеріалів (різання, зварювання, напилювання, гартування та інші) необхідно підтримувати певне співвідношення кисню та пропан-бутану, причому для різних матеріалів, що обробляються, це співвідношення повинно знаходитися в різних межах [1].

Від співвідношення кисню та пропан-бутану у пальній суміші залежить тип полум'я, його ефективна потужність і температура. Регулювання витрат кисню та пропан-бутану у пальній суміші пальника візуально по виду полум'я приводить до значних похибок [2].

**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** Контроль стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші пальника шляхом визначення хімічного складу продуктів згорання газоаналізаторами і хроматографами вимагають багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю [3].

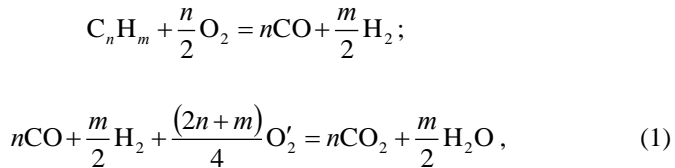
В роботі [4] розроблено та досліджено метод контролю витрат кисню та ацетилену у пальній суміші пальника по потоку випромінювання полум'я. Досліджено похибки методу контролю витрат кисню.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Не вирішено проблему контролю витрат кисню по потоку випромінювання

полум'я при спалюванні газів-замінників ацетилену, зокрема пропан-бутану. Тому розроблення та дослідження методу контролю витрат кисню пального по потоку випромінювання полум'я при спалюванні пропан-бутану є актуальною задачею.

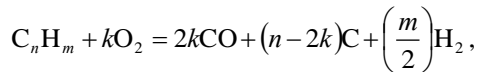
**Мета досліджень.** Спростити засіб контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану у пальній суміші пального.

**Основна частина.** В якості газів-замінників ацетилену при виконанні газополуменевої обробки матеріалів використовують стиснуті (водень, метан, природні гази), а також зріджені гази. Зріджені гази складаються в основному із пропану  $C_3H_8$  з домішками бутану  $C_4H_{10}$  в кількості 5...30 % [5]. В результаті реакції горіння при стехіометричному співвідношенні кисню та пропан-бутану у пальній суміші кінцевими продуктами горіння є вуглекислий газ та вода. Реакція горіння проходить в дві стадії по схемі:



де  $C_n H_m$  – формула горючого газу;  $O_2$  – кисень пальної суміші;  $O'_2$  – кисень, що надходить з навколишнього повітря.

При недостатчі кисню у пальній суміші перша стадія реакції горіння проходить по схемі:



де  $k$  – кількість молекул кисню використаних в реакції горіння.

При цьому  $k < n/2$ , за межами ядра полум'я знаходяться продукти горіння  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  та тверді частинки сажового вуглецю. Частинки сажі випромінюють як тверді тіла та мають суцільний спектр випромінювання з досить високим коефіцієнтом чорноти.

Потік випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ)  $\Phi_e$  в інтервалі довжин хвиль  $d\lambda$  і енергетичну світимість АЧТ  $M_e$  з площею видимої частини  $A_1$  визначають за формулами:

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda; \quad M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1}, \quad (2)$$

де  $\Phi_e$  – потік випромінювання АЧТ;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $M_e$  – енергетична світимість АЧТ;  $A_1$  – площа видимої частини, яка знаходиться в полі зору ОЕП [6].

Енергетичну світимість полум'я визначено за виразом:

$$M_{ест} = \varepsilon_{п} M_e, \quad (3)$$

де  $M_{ест}$  – енергетична світимість сірого тіла (полум'я);  $\varepsilon_{п}$  – ступінь чорноти полум'я пальника.

Ступінь чорноти полум'я пальника  $\varepsilon_{п}$  визначено за виразом:

$$\varepsilon_{п} = 1 - \exp(-\tau), \quad (4)$$

де  $\tau = \tau_r + \tau_a$  – оптична товщина полум'я, яка складається з оптичних товщин газів  $\tau_r$  та дисперсної фази полум'я  $\tau_a$  [7].

Так як в інтервалі довжин хвиль  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м газу прозорі [8], то  $\tau_r = 0$ , а оптичну товщину полум'я визначено за виразом:

$$\tau = \tau_a = k_{\lambda} s, \quad (5)$$

де  $k_{\lambda}$  – спектральний показник поглинання випромінювання частинками сажі;  $s$  – товщина шару полум'я по лінії візування [7].

Спектральний показник поглинання полум'я визначено за формулою:

$$k_{\lambda} = \left( \frac{\mu}{\gamma} \right) \cdot k(r_o), \quad (6)$$

де  $\mu$  – концентрація частинок сажового вуглецю;  $\gamma$  – густина частинок;  $k(r_o)$  – функція, яка визначається оптичними розмірами частинок [8].

З формул (3-6) витікає, що чим більша концентрація частинок сажового вуглецю в полум'ї, тим більша інтенсивність його світіння і тим вище коефіцієнт чорноти полум'я.

Дослідження методу контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану у пальній суміші, виконано з застосуванням установки, показаній на рис. 1.

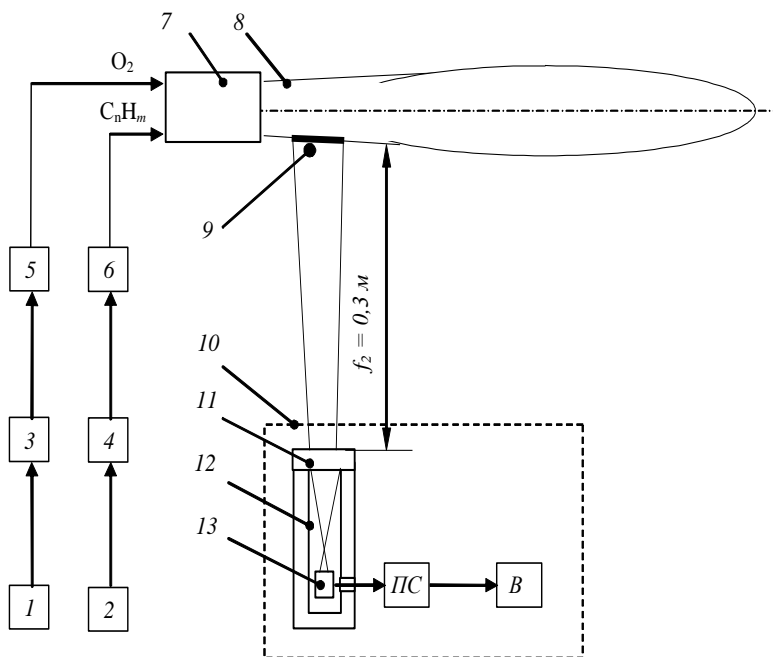


Рис. 1. Схема установки вимірювання потоку випромінювання сажового вуглецю полум'я: 1, 2 – балони кисневий та пропановий; 3, 4 – редуктори кисневий та пропановий; 5, 6 – ротаметри кисневий та пропановий; 7 – пальник; 8 – полум'я; 9 – майданчик візування; 10 – ОЕП; 11 – об'єktiv ОЕП; 12 – датчик ОЕП; 13 – приймач випромінювання;  $f_2$  – відстань від об'єктива до майданчика візування; ПС – підсилювач сигналу; В – вольтметр

Оптико-електронний прилад (ОЕП) 10 встановлено на відстані  $f_2 = 0,3 \text{ м}$  від осі струменя 8 пальника. Об'єktiv 11 ОЕП 10 вирізує майданчик візування 9. Вимірювання потоку випромінювання полум'я виконано кремнієвим фотодіодом 13, встановленим у корпусі 12 ОЕП 10. Сигнал з фотодіода 13 подано через підсилювач сигналу ПС на вольтметр В.



Вимірювання потоку випромінювання твердих частинок сажового вуглецю виконано ОЕП в спектральному діапазоні електромагнітних хвиль  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м, який не співпадає по довжині електромагнітних хвиль зі смугами випромінювання газів, які входять до складу газоподібних продуктів полум'я [8].

При стехіометричному співвідношенні кисню та пропан-бутану у пальній суміші гази згорають без залишку, за межами ядра полум'я вуглецю немає (див. формулу (1)). В цьому випадку  $\mu = 0$ ,  $k_\lambda = 0$ ,  $\tau = \tau_a = 0$ ,  $\tau_n = 0$ ,  $M_{\text{ест}} = \varepsilon_n M_e = 0$  (див. формули (3-6)), потік випромінювання полум'я, а відповідно і напруга на виході ОЕП дорівнюють нулю, так як між потоком випромінювання полум'я і напругою на виході ОЕП існує зв'язок:

$$U = \tau_c \tau_o M_{\text{ест}} \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2f_1} \right)^2 SR_{\text{зз}}; \quad M_e = \frac{\Phi_e}{Q}, \quad (7)$$

де  $U$  – напруга на виході ОЕП;  $\tau_c$  – коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем;  $\tau_o$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи;  $D_{\text{вх}}$  – діаметр входу оптичної системи ОЕП;  $f_1$  – відстань від лінзи до зображення об'єкта;  $S$  – інтегральна чутливість приймача випромінювання;  $R_{\text{зз}}$  – опір резистора зворотного зв'язку операційного підсилювача сигналу;  $\Phi_e$  – потік випромінювання частинок;  $Q$  – площа майданчика візування [9].

Технологічний процес формування полум'я пальника представимо, як об'єкт з одним входом та одним виходом. Зв'язок напруги на виході ОЕП та витратами кисню представлено функціональною залежністю:

$$U = f(V_k), \quad (8)$$

де  $V_k$  – витрати кисню.

При постійних витратах пропан-бутану  $V_n$  змінювали витрати кисню  $V_k$  з кроком  $h$ , та виконували вимірювання напруги на виході ОЕП. Початковий напрям руху робочої точки по характеристиці об'єкта вибрано в сторону збільшення  $V_k$ . Систематична похибка вимірювання напруги на виході ОЕП дорівнює  $\Delta_c = 0,044$  В [10]. Звідси значення поправки  $\Delta_c = -c$ . Значення напруги з врахуванням поправки (табл. 1) визначено за виразом:

$$U'_i = U_i + c, \quad (9)$$

де  $U'_i$  – значення напруги на виході ОЕП  $i$ -того досліджу з врахуванням поправки;  $U_i$  – значення напруги на виході ОЕП  $i$ -того досліджу;  $c$  – поправка.

Таблиця 1

**Середні арифметичні значення напруги на виході ОЕП**

Номер досліджу, $i$	$V_k$	$U_i$	$U'_i$	Номер досліджу, $I$	$V_k$	$U_i$	$U'_i$
1	11	7,2	7,156	7	17	0,8	0,756
2	12	6,8	6,756	8	18	0,1	0,056
3	13	4,4	4,356	9	19	0,044	0
4	14	3,1	3,056	10	20	0,044	0
5	15	1,6	1,556	11	21	0,044	0
6	16	1,3	1,256				

За результатам експерименту побудовано криву залежності напруги на виході ОЕП від витрат кисню газового пальника  $U = f(V_k)$ , яка є робочою характеристикою об'єкта дослідження (рис. 2).

При збільшенні витрат кисню та при незмінних витратах пропан-бутану (10 л/хв) потік випромінювання частинок сажового вуглецю зменшується і відповідно зменшується напруга на виході ОЕП. При значеннях витрат кисню 19, 20 та 21 л/хв напруга на виході ОЕП дорівнює 0 В (див. точки 2, 3 та 4 на робочій характеристиці об'єкта). При витратах кисню 18 л/хв (точка 1) в полум'ї є залишки палива, бо є випромінювання частинок сажового вуглецю і при цьому напруга на виході ОЕП дорівнює 0,056 В. Оскільки  $18 < 19 < 20$  л/хв, то точка 2 відповідає найменшому значенню витрат кисню при якому напруга на виході ОЕП дорівнює 0 В. Тоді значення витрат кисню  $V_{кв}$ , яке відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану у пальній суміші, визначено за спадом до нуля потоку випромінювання частинок сажового вуглецю і дорівнює 19 л/хв.

При виконанні контролю витрат кисню вибрано нижню  $U_n = 0$  В та верхню  $U_v = 0,02$  В межі допускового інтервалу для значень параметра, що вимірюють. При значенні напруги на виході ОЕП, яке знаходиться в допусковому інтервалі  $U_n \leq U_i \leq U_v$ , витрати кисню збільшувати

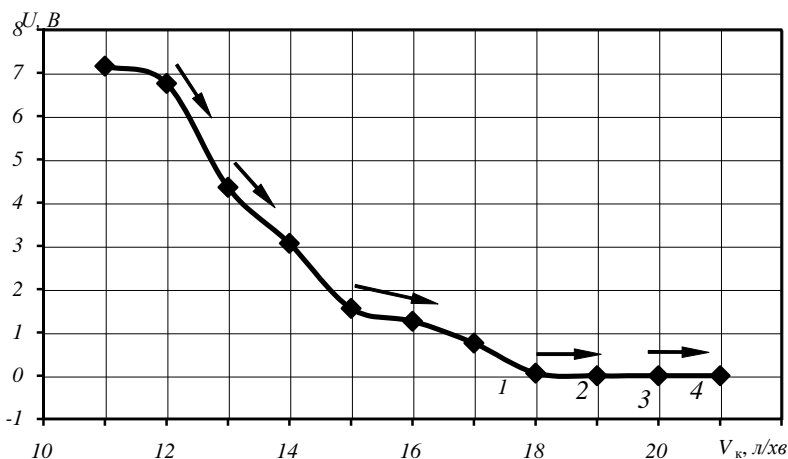


Рис. 2. Залежність напруги на виході ОЕП від витрат кисню (витрати пропан-бутану 10,0 л/хв)

припиняють. При цьому: витрати кисню  $V_{кк} = 19$  л/хв і відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану у пальній суміші газового пальника; отримано нормальне (нейтральне) полум'я; результат вимірювального контролю – об'єкт придатний (табл. 2).

Таблиця 2

### Результати контролю витрат кисню пальника

Номер дослідження, $i$	$V_{кi}$ , л/хв	$U'_i$ , В	Перевірка виконання умови $U_n \leq U_i \leq U_b$ , В	Результати контролю
1	11	7,156	$0 < 7,156 > 0,02$	Об'єкт непридатний
2	12	6,756	$0 < 6,756 > 0,02$	Об'єкт непридатний
3	13	4,356	$0 < 4,356 > 0,02$	Об'єкт непридатний
4	14	3,056	$0 < 3,056 > 0,02$	Об'єкт не придатний
5	15	1,556	$0 < 1,556 > 0,02$	Об'єкт непридатний
6	16	1,256	$0 < 1,256 > 0,02$	Об'єкт непридатний
7	17	0,756	$0 < 0,756 > 0,02$	Об'єкт непридатний
8	18	0,056	$0 < 0,056 > 0,02$	Об'єкт непридатний
9	19	0	$0 = 0 < 0,02$	Об'єкт придатний

Об'єкт непридатний, якщо значення параметра  $U_i$ , що вимірюють, (напруга на виході ОЕП) знаходиться за межами допускового інтервалу  $U_i > U_b$ , при цьому  $V_k < V_{кн}$  – отримано полум'я збагачене вуглецем. Об'єкт придатний, якщо значення параметра  $U_i$ , що вимірюють, знаходиться в межах допускового інтервалу  $U_n \leq U_i < U_b$ , при цьому  $V_{кв} \geq V_k > V_{кн}$ , витрати кисню припиняють збільшувати, отримано нейтральне (нормальне) полум'я. При подальшому збільшенні витрат кисню  $U_i = U_n = 0$  В, але  $V_k > V_{кв}$ . В останньому випадку об'єкт непридатний, отримано окислювальне полум'я.

## Висновки

Розроблений метод контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану у пальної суміші пальника, забезпечує повне згорання пропан-бутану та кисню без залишку, так як, контроль повного згорання пропан-бутану ведеться не по потоку випромінювання газоподібних продуктів згорання пальної суміші пальника, а по потоку випромінювання залишку горючого газу в формі атомарного вуглецю (сажі) за межами ядра полум'я.

Операції вимірювання витрат кисню, витрат пропан-бутану та напруги на виході ОЕП виконують за допомогою простих приладів і не вимагають високого рівня кваліфікації оператора.

Абсолютна систематична похибка вимірювання напруги на виході ОЕП дорівнює 0,044 В. Так як відомо значення та знак похибки, то вона може бути видалена шляхом введення поправки.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Справочник сварщика / [Денисов Ю. А., Кочева Г. Н., Маслов Ю. А. и др.]; под ред. В. В. Степанова. – 4-е изд., перераб и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 560 с.

2. Соколов И. И. Газовая сварка и резка металлов : учебник для техн. училищ. 2-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. школа, 1981. – 320 с.

3. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплотехнических процессов» / В. П. Преображенский. – 3-е изд. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.

4. Ночвай В. М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в

машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 6. – С. 30–40.

5. Верховенко Л. В. Справочник сварщика / Л. В. Верховенко, А. К. Тукин. – Минск : Вышэйш. шк., 1977. – 366 с.

6. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения / Ю. Г. Якушенко. – М. : Сов. радио, 1977. – 272 с.

7. Блох А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А. Г. Блох. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 240 с.

8. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2006. – № 4. – С. 69–76.

9. Ночвай В. М. Встановлення зв'язку між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Практична космонавтика і високі технології», присвяченої 100-річчю з дня народження академіка С. П. Корольова. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – С. 95–96.

10. Ночвай В. М. Дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок / В. М. Ночвай, В. Г. Петрук. // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2008. – № 4 (43). – С. 43–48.

*Опубліковано в матеріалах 17-ї Міжнародн. наук.-техн. конф.  
«Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика».*

*4-8 вересня 2017 р.*

*Київ : АТМ України, 2017. – С. 123–126.*

## **ЗАСІБ КОНТРОЛЮ СТЕХІОМЕТРИЧНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ КИСНЮ ТА ГОРЮЧОГО ГАЗУ У ПАЛЬНІЙ СУМІШІ ПАЛЬНИКА**

В.М. Ночвай В.М., Л.Г. Полонський, В.В. Серов, Р.В. Карплюк

Підвищення надійності та довговічності сучасних машин та обладнання є важливою задачею машинобудування. Одним із шляхів розв'язання цієї задачі є застосування захисних покриттів. Серед існуючих методів нанесення захисних покриттів важливе місце займають газотермічні методи напилювання покриттів. Напилюванням покриттів

можна в 2...5 разів зменшити спрацювання деталей, а також ефективно відновлювати спрацьовані деталі.

При зварюванні вуглецевих сталей процес ведуть нормальним або трохи збагаченим вуглецем полум'ям. При напилюванні покриттів, а також при зварюванні легованих сталей, міді, бронзи, нікелю, алюмінію і при газовому паянні металів процес ведуть нормальним (нейтральним) полум'ям. Якість наплавленого металу, міцність зварного шва та паяного з'єднання в значній мірі залежить від складу полум'я, тому під час зварювання зварник повинен слідкувати за його типом, регулювати його склад протягом всього процесу зварювання.

Нормальне полум'я теоретично отримують тоді, коли співвідношення кисню та горючого газу у пальній суміші пального є стехіометричним, яке розраховують за формулою хімічної реакції процесу горіння палива. Але формула не враховує забрудненість робочих газів.

Встановлення співвідношення кисень-горючий газ у пальній суміші пального візуально за виглядом полум'я приводить до значних похибок, а відтак і низький ступінь вірогідності контролю.

Методи контролю стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу у пальній суміші пального шляхом визначення хімічного складу продуктів згорання пальної суміші газоаналізаторами і хроматографами дають високу точність та вірогідність контролю, але вимагають багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю.

Актуальність роботи викликана наявною проблемою, яка полягає в необхідності підвищення швидкодії засобу контролю та вірогідності контролю витрат кисню з застосуванням нескладної інструментальної бази, яка не вимагає високого рівня кваліфікації оператора.

Результати розробки та дослідження методу контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу у пальній суміші пального приведені в роботах [1-11]. Суть методу контролю витрат кисню  $V_{кк}$ , які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу у пальній суміші пального, полягає у тому, що при незмінних витратах горючого газу витрати кисню збільшують з кроком  $h$  і визначають величину витрат кисню  $V_{кк}$  за спадом до нуля величини потоку випромінювання частинок сажового вуглецю за межами ядра полум'я.

З метою реалізації методу контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу у пальній суміші пального, розроблено та досліджено засіб контролю

стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу у пальній суміші пального. Оптико-електронний прилад (ОЕП) «Вуглець» призначений для вимірювання потоку випромінювання твердих частинок, які знаходяться у високотемпературному двофазному потоці газ-тверді частинки. ОЕП «Вуглець» є засобом контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пального газу у пальній суміші пального будь-якого типу та призначення.

При проектуванні оптико-електронного приладу спрощено його структурну реалізацію завдяки таким рішенням:

а) застосовано пасивний метод роботи ОЕП, оскільки полум'я газового пального є потужним тепловим лінійним випромінювачем;

б) застосовано прямий прийом оптичного випромінювання полум'я пального;

в) уникнуто застосування інтерференційних фільтрів, оскільки спектральний діапазон вимірювання потоку випромінювання полум'я обмежено спектральною чутливістю приймача випромінювання (довжина хвилі від 0,5 до 1,1 мкм);

г) уникнуто градування шкали приладу по моделі абсолютно чорного тіла (АЧТ), оскільки вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю виконують в умовних одиницях.

Експериментально-дослідний зразок спрощеного ОЕП має невеликі габарити (88 × 58 × 31 мм) та масу (0,27 кг) (рис. 1).

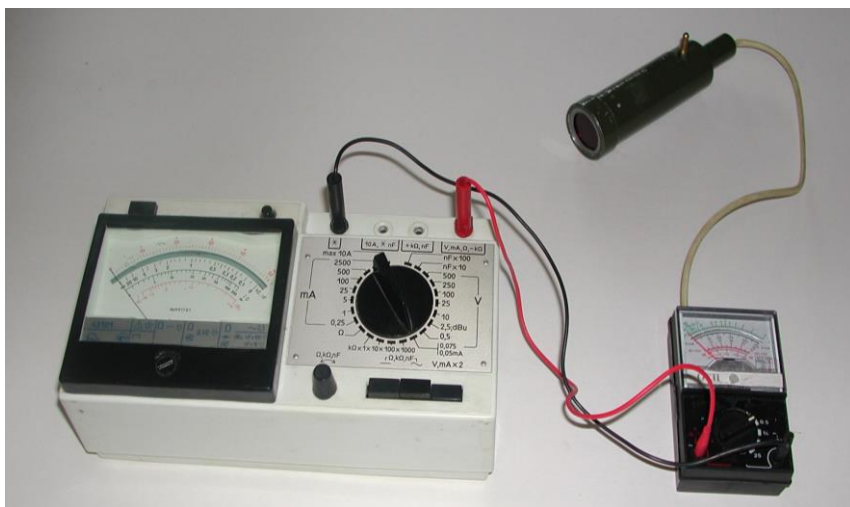


Рис. 1. ОЕП «Вуглець» з додатковим приладом мод. 43101

Таблиця 1

**Показники точності визначення витрат кисню**

Найменування показника точності	Значення показника
Границі, в яких з ймовірністю $P = 0,95$ знаходиться сумарна похибка результату визначення витрат кисню $\delta$ , %	$\pm 7,5$
Границі, в яких з ймовірністю $P = 0,95$ знаходиться методична похибка результату визначення витрат кисню $\delta_{vh}$ , %	2,81
Оцінка с. к. в. випадкової похибки, $\bar{\sigma}(\delta_b)$ %	1,08
Оцінка с. к. в. сумарної похибки, $\bar{\sigma}(\delta)$ %	1,18
Густина розподілу ймовірностей сумарних похибок $P(\Delta)$ , $(л/хв)^{-1}$	0,152

Завдяки встановленому зв'язку між напругою на виході ОЕП та потоком випромінювання частинок сажового вуглецю, вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю виконують в умовних одиницях, що спрощує операції вимірювального контролю і не потребує високого рівня кваліфікації оператора.

Прилад розрахований для експлуатації у виробничих та лабораторних умовах.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Пат. 76332 Україна, МПК F23N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041008025 ; заявл. 04.10.04 ; опубл. 17.07.06, Бюл. № 7.

2. Ночвай В. М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 6. – С. 30–40.

3. Серов В. В. Излучение двухфазного факела и его связь с параметрами напыления / В. В. Серов, В. М. Ночвай // Праці Житомирського філіалу КПІ. – Житомир : ЖФ КПІ, 1993. – Вип. 1. – С. 176–180.

4. Ночвай В. М. Определение оптимальной дистанции газопламенного напыления / В. М. Ночвай, В. В. Серов, А. И. Тютюнник //



Повышение эффективности производства машиностроительных предприятий : Республ. науч.-техн. конф., 23–24 мая 1990 г. : тезисы докл. – Душанбе : ТаджикНИИНТИ, 1990. – С. 110–111.

5. Пат. 75542 Україна, МПК G01F 3/00. Спосіб визначення оптимальної дистанції напилювання покриттів / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041108891 ; заявл. 01.11.04 ; опубл. 17.04.06, Бюл. № 4.

6. Пат. 77518 Україна, МПК G01F 1/76; G05D 11/00. Спосіб вимірювання витрат твердих часток у високотемпературному газовому потоці / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041109124 ; заявл. 08.11.04 ; опубл. 15.12.06, Бюл. № 12.

7. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ – тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2006. – № 4. – С. 69–76.

8. Ночвай В. М. Встановлення зв'язку між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок двофазного потоку газ – тверді частинки / В. М. Ночвай // Практична космонавтика і високі технології : VI Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 100-річчю з дня народж. акад. С. П. Корольова, 9–11 січ. 2007 р. : тези доп. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – С. 95–96.

9. Ночвай В. М. Технологічні особливості методу контролю оптимальних параметрів газополуменевого напилювання покриттів / В. М. Ночвай, В. Г. Петрук // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте : 8-й Междунар. науч.-техн. семинар, 26–28 фев. 2008 г. : тезисы докл. – К. : АТМ України, 2008. – С. 187–189.

10. Ночвай В. М. Метод експрес-пошуку оптимальних параметрів газополуменевого напилювання покриттів / В. М. Ночвай // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте : 7-й Междунар. науч.-техн. семинар, 20–22 фев. 2007 г. : тезисы докл. – К. : АТМ України, 2007. – С. 148–149.

11. Ночвай В. М. Дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок / В. М. Ночвай, В. Г. Петрук // Вісник ЖДТУ. – 2008. – № 4. – С. 43–48.

УДК 621.317.39.084.2

## **ПРОЕКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ ПІРОМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК В ДВОФАЗНОМУ ПОТОЦІ**

В.М. Ночвай

*В роботі удосконалено вимірювальний прилад контролю витрат кисню газового пальника з використанням нескладної інструментальної бази, яка не вимагає високого рівня кваліфікації оператора. Виконано проектування та дослідження електронного блоку пірометра. Пірометр призначений для вимірювання потоку частинок у високотемпературному двофазному потоці. Робочий діапазон спектру електромагнітних хвиль від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м.*

*Виконано обґрунтування вибору приймача випромінювання та проведено розрахунок електричного сигналу на приймачі випромінювання. Приймачем випромінювання є фотодіод ФД-25К, який є селективним, має невелику інерцію, невеликі розміри, працює при невеликій напрузі джерела живлення. Спектральний діапазон вимірювання потоку випромінювання полум'я обмежено спектральною чутливістю приймача випромінювання (довжина хвилі  $0,5 \cdot 10^{-6}$  ...  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м).*

*Виконано проектування підсилювача сигналу. Підсилювачем сигналу є перетворювач електричного струму фотодіода в напругу. Фотодіод ввімкнено в фотогальванічному режимі (без напруги зсуву), що забезпечує відсутність темнового струму. В статті приведено розрахункові та експериментальні значення параметрів електронного блоку вимірювального приладу.*

**Ключові слова:** *потік випромінювання, тверді частинки, кисень, полум'я, вимірювальний прилад, підсилювач сигналу, приймач випромінювання.*

**Постановка проблеми.** При виконанні контролю стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальної суміші пальника необхідно визначати хімічний склад продуктів згорання цієї суміші.

Визначення хімічного складу продуктів згорання газоаналізаторами і хроматографами вимагають багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю. Виконувати контроль витрат кисню газових пальників неможливо без застосування складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю. Крім того, контроль стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші пальника неможливо проводити оперативно та вчасно реагувати на його зміну. Тому удосконалення засобу контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в пальній суміші пальника, є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми.** В роботі [2, с. 75] встановлено, що головним джерелом випромінювання продуктів згорання газоподібних палив є молекули вуглекислого газу та води, енергія їх випромінювання зосереджена в спектральних смугах з максимумами випромінювання, що відповідають довжинам електромагнітних хвиль 1,38, 1,87, 1,9, 2,7, 4,3, 6,3, 15 мікрометрів та смуги випромінювання, що відповідає довжині хвилі  $(18...75) \cdot 10^{-6}$  м. Випромінювання частинок сажі, які знаходяться в високотемпературному двофазному потоці газ-тверді частинки, мають суцільний спектр випромінювання, так як випромінюють енергію всіх довжин хвиль в видимому та інфрачервоному діапазонах спектру. Визначено діапазон вимірювання потоку випромінювання твердих частинок в області спектру електромагнітних коливань з довжиною хвилі від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м, який дає можливість застосовувати оптико-електронні прилади (ОЕП), в конструкцію яких не входять інтерференційні фільтри, так як в цій області спектру газу прозорі [2, с. 75].

Для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію використовують фотоелектричні (фотонні, або селективні) та теплові (неселективні) приймачі випромінювання [6, с. 98]. До селективних приймачів відносяться фотодіоди, які мають невеликі габарити, можливість працювати при невеликій напрузі джерела живлення [4, с. 155]. Область спектральної чутливості фотодіодів: германієвих  $(0,4...1,9) \cdot 10^{-6}$  м з максимумом чутливості на довжині хвилі  $1,6 \cdot 10^{-6}$  м; кремнієвих  $(0,5...1,2) \cdot 10^{-6}$  м з максимумом чутливості на довжині хвилі  $1,0 \cdot 10^{-6}$  м. Інтегральна чутливість складає  $(10...20) \cdot 10^{-3}$  А/лм та  $(3...20) \cdot 10^{-3}$  А/лм для германієвих та кремнієвих фотодіодів відповідно [1, с. 196].

Для створення підсилювача сигналу з великим коефіцієнтом підсилення використовують мікросхеми серії К140, які є операційними підсилювачами сигналу [5, с. 330].

**Постановка завдання.** Метою даної статті є підвищення швидкодії та спрощення засобу контролю витрат кисню із застосуванням нескладної інструментальної бази.

**Обґрунтування вибору приймача випромінювання.** На підставі результатів аналізу властивостей та характеристик полум'я газового пальника, класифікації приймачів випромінювання, а також у відповідності з вибраним діапазоном вимірювання потоку випромінювання полум'я вироблено вимоги до приймача випромінювання: область спектральної чутливості  $(0,5...1,1) \cdot 10^{-6}$  м; селективний; мало інерційний; має невеликі габарити; можливість роботи при невеликій потужності, що споживається. Таким вимогам відповідають фотонні приймачі з внутрішнім фотоефектом, а саме фотодіоди.

При виборі типу фотодіода в якості приймача потоку випромінювання у першу чергу необхідно керуватись його спектральною чутливістю і можливістю разом з оптичною системою ОЕП вирішувати задачі оптимальної оптичної спектральної фільтрації при виділенні сигналів на тлі перешкод.

Спектральні характеристики серійних фотодіодів суттєво відрізняються (рис. 1) [4, с. 156].

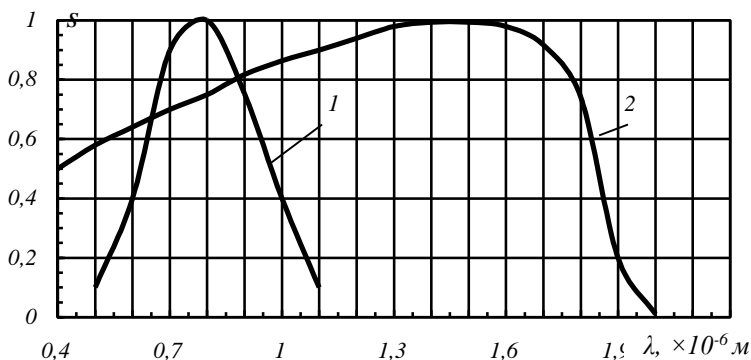


Рис. 1. Спектральні характеристики серійних фотодіодів:  
1 – кремнієвого; 2 – германієвого

Згідно з вибраним діапазоном вимірювання потоку випромінювання твердих частинок (інтервал довжин хвиль від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м) [2, с. 75] та з метою обмеження спектрального діапазону спектральною чутливістю приймача випромінювання, застосовано кремнієвий фотодіод ФД-25К.

**Розрахунок електричного сигналу на приймачі випромінювання.** Електричний сигнал приймача виражають в міліамперах. Але для електронної схеми необхідно електричний сигнал представити у виді напруги. Для фотодіодів, що працюють у вентиляльному режимі (внутрішній опір приймача  $R_i = \text{const}$ ), точне визначення напруги електричного сигналу  $U_s$  аналітично неможливе; напругу електричного сигналу  $U_s$  необхідно визначати графоаналітичним способом. Основне рівняння фотодіода має вид

$$I_{sc} = I_s \left( \exp \frac{eU_{ph}}{A_s kT} - 1 \right) + \frac{U_{ph}}{R_l}, \quad (1)$$

де  $I_{sc}$  – струм короткого замикання;  $I_s$  – струм насичення;  $e$  – заряд електрона;  $U_{ph}$  – напруга на фотодіоді;  $A_s$  – коефіцієнт, що залежить від типу фотодіода, для кремнієвого фотодіода  $A_s = 1$ ;  $T$  – температура фотодіода, К;  $k$  – постійна Больцмана;  $R_l$  – опір навантаження [3, с. 23].

Якщо  $R_l = \infty$ , то

$$U_{ph} = U_s = \frac{A_s kT}{e} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right). \quad (2)$$

З формули (2) випливає, що  $U_s$  є нелінійною функцією від  $I_{sc}$ . Якщо  $R_l \neq \infty$ , то рівняння (2) перетворюється трансцендентне і визначити  $U_s$  можна тільки графічним шляхом.

Опір p-n переходу при  $U_{ph} = 0$  позначимо як

$$R_0 = \frac{A_s kT}{eI_s} /, \quad (3)$$

і приймемо:  $\alpha = \frac{R_l}{R_0}$ ;  $\beta = \frac{I_l}{I_s}$ ;  $I_l = \frac{U_{ph}}{R_l}$ . Тоді рівняння (2) приймає вид

$$\frac{I_{sc}}{I_s} = e^{\alpha\beta} - (1-\beta), \quad \text{або} \quad \frac{I_l}{I_{sc}} = \frac{\beta}{\exp(\alpha\beta) - (1-\beta)}. \quad (4)$$

З рівняння (4) випливає, що

$$\frac{I_l}{I_{sc}} = f\left(\frac{I_{sc}}{I_s}, \alpha\right). \quad (5)$$

На рис. 2а, б приведені залежності

$$\varphi = \frac{\frac{I_l}{I_{sc}} = f\left(\frac{I_{sc}}{I_s}, \alpha\right)}{\frac{I_l}{I_{sc}}}, \quad \psi = \frac{I_l}{I_{sc}} = f(\alpha) \quad (6)$$

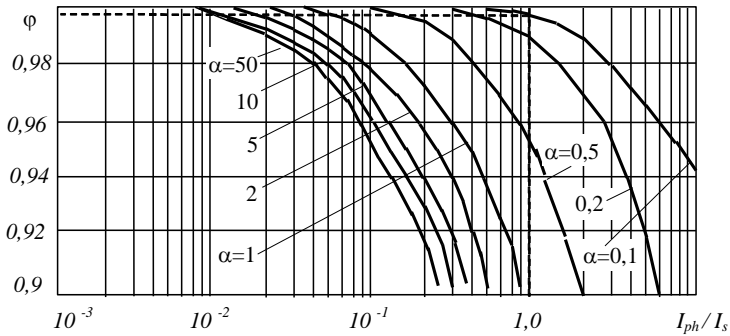
при  $I_{sc} / I_s = 10^{-4}$ , які дають можливість виконати розрахунки по визначенню оптимальних режимів роботи і параметрів схеми при заданих параметрах фотодіода:

$$I_l = \varphi \cdot \psi \cdot I_{sc}; \quad U_s = U_{ph} = \varphi \cdot \psi \cdot I_{sc} \cdot R_l. \quad (7)$$

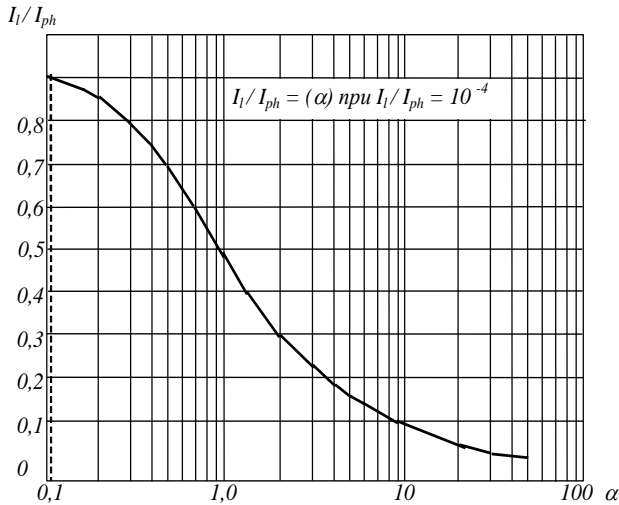
Для вибраного екземпляра фотодіода ФД-25К шляхом вимірювання визначено наступні значення параметрів: струм насичення  $I_s = 38 \cdot 10^{-6}$  А; струм короткого замикання  $I_{sc} = 40 \cdot 10^{-6}$  А; внутрішній опір приймача  $R_0 = 7 \cdot 10^5$  Ом. Опір навантаження  $R_l = 13 \cdot 10^3$  Ом. Тоді  $\alpha = 0,0185$ ,  $I_{sc}/I_s = 1,05$ .

По кривим залежностей, приведених на рисунку 2 графічним способом визначено:  $\varphi = 0,998$ ;  $\psi = 0,9$ . Звідси визначено:  $I_l = 0,998 \cdot 0,9 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 35,93 \cdot 10^{-6}$  А. Після підстановки чисельних значень  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $I_{sc}$  та  $R_l$  в формулу (7) отримано:  $U_s = U_{ph} = 0,998 \cdot 0,9 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 13 \cdot 10^3 = 0,467$  В.

**Проектування підсилювача сигналу.** При проектуванні підсилювача сигналу застосовано перетворювач струм-напруга в парі з фотодіодом. Зв'язання фотодіода у фотогальванічному режимі (без напруги зсуву) на малоомне навантаження зменшує температурний коефіцієнт інтегральної чутливості.



a)



б)

Рис. 2. Визначення сигналу фотодіода [3, с. 24]

Ще одна перевага такого ввімкнення – відсутність темнового струму, що особливо важливо у випадку гальванічного зв'язку з наступними каскадами при вимірюванні безупинних світлових потоків. Важливою перевагою схеми є те, що при зміні опору резистора зворотного зв'язку  $R_{bf}$  від сотень ом до декількох мегом можна вимірювати освітленості, що відрізняються в сотні тисяч разів.

Напругу на виході підсилювача та опір резистора зворотного зв'язку визначено за формулами:

$$U_{out} = R_{bf} I_{ph}, \quad R_{bf} = U_{out} / I_{ph}. \quad (8)$$

Прийнято напругу живлення підсилювача  $U_{ж \text{ стаб}} = \pm 7,8 \text{ В}$ . Тоді, найбільше можливе значення напруги на виході підсилювача  $U_{out} = 7,8 \text{ В}$ , а опір резистора при  $I_{ph} = I_l$  дорівнює:  $R_{bf} = 0,217 \cdot 10^6 \text{ Ом}$ . Прийнято значення опору резистора зворотного зв'язку рівним  $2 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ . В якості підсилювача застосовано мікросхему типу К140УД6.

Так як сигнальний струм фотодіода пропорційний освітленості  $E$  та інтегральній чутливості фотодіода  $S$  ( $I_{ph} = E \cdot S$ ), то напругу на виході підсилювача з урахуванням формули (8) визначено за виразом

$$U_{out} = E \cdot S \cdot R_{bf} = I_{ph} \cdot R_{bf} \quad (9)$$

і після підстановки числових значень струму  $I_l$  та опору резистора зворотного зв'язку  $R_{bf}$  в формулу (9) отримано:  $U_{out} = 7,186 \approx 7,2 \text{ В}$ .

**Дослідження електричних параметрів ОЕП.** Графічним методом визначено струм навантаження  $I_l = 35,9 \cdot 10^{-6} \text{ А}$  та напругу сигналу  $U_s = 0,467 \text{ В}$  на виході фотодіода, а шляхом розрахунку визначено напругу на виході підсилювача сигналу  $U_{out} = 7,2 \text{ В}$ . Необхідно експериментальним шляхом визначити електричні параметри ОЕП і порівняти їх значення з розрахунковими. Дослідження проведено з застосуванням установки, показаній на рисунку 3.

Джерелом випромінювання служить розжарена вольфрамова нитка лампи РН8-20, попередньо «відпалена» на номінальних режимах на протязі 10% від загального терміну служби. Освітлювач  $I$  та ОЕП  $III$  встановлені горизонтально, їх оптичні осі співпадають на осі  $II$ . Відстань від розсіювальної лінзи 3 освітлювача ОИ-19 до лінзи 8 фотооб'єктива ОЕП дорівнює 0,3 м. Лампа розжарювання 2, потужністю 20 Вт, живиться змінним струмом від блоку живлення  $БЖ$ , який забезпечує регулювання сили струму в електричному колі лампи в межах 1,45...2,52 А. Регулювання величини потоку випромінювання нитки лампи розжарювання виконано за допомогою діафрагми 4. При виконанні дослідів виконано вимірювання фотоструму  $I_{ph}$  фотодіода, напруги  $U_s$  на виході фотодіода та напруги  $U_{out}$  на виході підсилювача сигналу з застосуванням вимірювальних приладів типу 43101 (рис. 4).



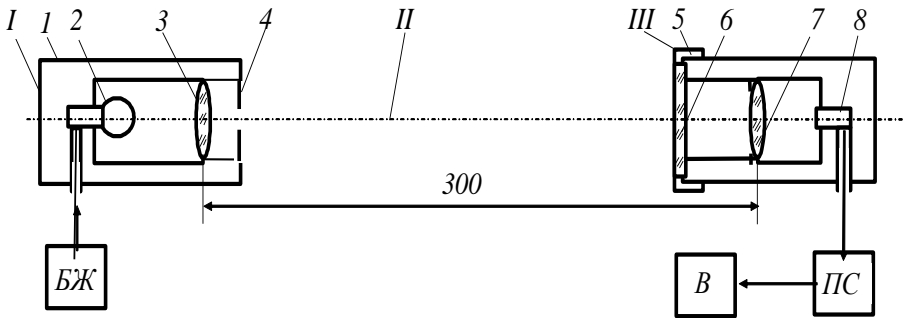


Рис. 3. Схема установки дослідження ОЕП:

*I* – освітлювач ОИ-19: 1 – корпус освітлювача; 2 – лампа розжарювання мод. РН8-20; 3 – розсіювальна лінза; 4 – діафрагма; БЖ – блок живлення;  
*II* – оптична вісь; *III* – ОЕП; 5 – корпус давача ОЕП; 6 – світлофільтр;  
 7 – лінза; 8 – приймач випромінювання; ПС – підсилювач сигналу;  
 В – вольтметр

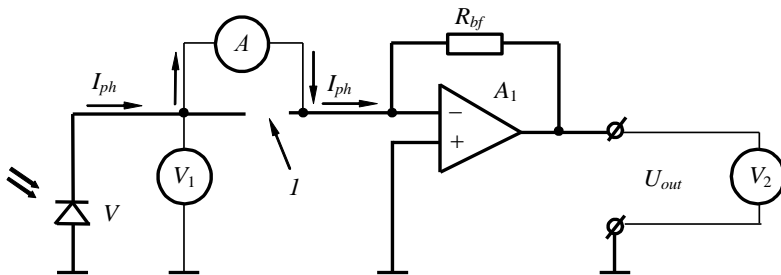


Рис. 4. Схема вимірювань електричних параметрів спрощеного ОЕП:  
 $A_1$  – операційний підсилювач;  $V$  – фотодіод;  $R_{bf}$  – резистор зворотного зв'язку;  $I_{ph}$  – струм фотодіода;  $A$  – амперметр;  $V_1, V_2$  – вольтметри;  
 $I$  – розрив провідника струму на час проведення експерименту

Після статистичної обробки результатів експерименту отримано середні арифметичні значення струму фотодіода  $I_{ph}$ , напруги на виході фотодіода  $U_s$  та на виході операційного підсилювача сигналу  $U_{out}$  (табл. 1). Напруга  $U_{out}$  на виході підсилювача знаходиться в прямопропорційній залежності від фотоструму  $I_{ph}$  фотодіода.

Таблиця 1

**Середні арифметичні значення результатів вимірювань потоку випромінювання вольфрамової нитки лампи розжарювання**

Номер досліджу, $i$	Струм фотодіода $I_{ph}$ , $10^{-6}$ А	Напруга на виході		Номер досліджу, $i$	Струм фотодіода $I_{ph}$ , $10^{-6}$ А	Напруга на виході	
		фотодіода $U_{ph}$ , В	Підсилювача $U_{out}$ , В			фотодіода $U_{ph}$ , В	підсилювача $U_{out}$ , В
1	2	0,050	0,28	11	22	0,430	4,0
2	4	0,105	0,68	12	24	0,445	4,4
3	6	0,126	1,0	13	26	0,450	4,8
4	8	0,250	1,40	14	28	0,450	5,2
5	10	0,290	1,75	15	30	0,455	5,6
6	12	0,340	2,10	16	32	0,455	6,0
7	14	0,360	2,50	17	34	0,460	6,4
8	16	0,390	2,90	18	36	0,464	6,8
9	18	0,400	3,2	19	38	0,465	7,2
10	20	0,420	3,6				

Результати проведених досліджень підтверджують достовірність значень параметрів оптико-електронного приладу, до яких відноситься зокрема задовільна збіжність результатів експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків (табл. 2).

Таблиця 2

**Розрахункові та експериментальні значення параметрів ОЕП**

№ п.п.	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення параметра	
			розрахункове	експериментальне
1.	Струм навантаження фотодіода, $I_l$	А	$35,9 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$
2.	Струм насичення фотодіода, $I_s$	А	–	$38 \cdot 10^{-6}$
3.	Струм короткого замикання фотодіода, $I_{sc}$	А	–	$40 \cdot 10^{-6}$
4.	Напруга сигналу, $U_s$	В	0,467	0,465
5.	Напруга на виході підсилювача сигналу, $U_{out}$	В	7,2	7,2

## Висновки

Застосування селективного приймача випромінювання дало можливість обмежити спектральний діапазон вимірювання потоку випромінювання полум'я спектральною чутливістю приймача випромінювання (довжина хвилі від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м).

Застосований в якості приймача випромінювання фотодіод ФД-25К відповідає вимогам: селективний; мало інерційний; має невеликі габарити; можливість роботи при невеликій потужності, що споживається.

Технічні характеристики розробленого оптико-електронного приладу відповідають вимогам, які висуваються до приладу, за допомогою якого виконують вимірювальний контроль витрат кисню газового пальника. А саме: робочий діапазон спектру –  $(0,5 \dots 1,1) \cdot 10^{-6}$  м; діапазон вимірювання напруги на виході підсилювача сигналу –  $0 \dots 7,2$  В; напруга джерела живлення –  $\pm 9$  В; діаметр корпусу давача –  $0,035$  м; довжина корпусу давача –  $0,12$  м; габарити електронного блоку: довжина –  $0,088$  м; ширина –  $0,058$  м; висота –  $0,031$  м; маса приладу –  $0,27$  кг.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Климков Ю. М. Основы расчёта оптико-электронных приборов с лазерами / Ю. М. Климков. – М. : Сов. радио, 1978. – 264 с.
2. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць ЖДТУ. – 2006. – № 4. – С. 69-76.
3. Поскачей А. А. Оптико-электронные измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
4. Справочник по приёмникам оптического излучения / [Волков В. А., Вялов В. К., Гассанов Л. Г. и др.]; под. ред. Л. З. Криксунова и Л. С. Кременчугского. – К. : Техніка, 1985. – 216 с.
5. Терещук Р. М. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства : справоч. / Р. М. Терещук, К. М. Терещук, С. А. Седов. – 3-е изд., перераб. и доп. – К. : Наукова думка, 1987. – 800 с.
6. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения : учеб. для вузов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Сов. радио, 1977. – 272 с.

УДК 681.785.423: 535.317.2

## **ПРОЕКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПІРОМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК В ДВОФАЗНОМУ ПОТОЦІ**

В.М. Ночвай

*Удосконалено вимірювальний прилад контролю витрат кисню газового пальника із застосуванням нескладної інструментальної бази, яка не вимагає високого рівня кваліфікації оператора. Виконано проектування та дослідження оптичної системи пірометра. Пірометр призначений для вимірювання потоку випромінювання твердих частинок сажі у високотемпературному двофазному потоці. Робочий діапазон спектру –  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м.*

*Проектуючи структурну схему пірометра, враховано, що двофазний струмінь газового пальника є потужним тепловим випромінювачем. Як випромінювач використано власне випромінювання двофазного струменя газового пальника, тому метод теплового контролю визначено як пасивний. З метою спрощення структурної схеми пірометра застосовано пряме приймання оптичного випромінювання, тобто безпосередню реєстрацію енергії, яка падає на приймач. В результаті спрощено конструкцію пірометра та підвищено його надійність.*

*Вимірювання потоку випромінювання частинок вуглецю (сажі) виконують у вузькому спектральному діапазоні електромагнітних хвиль ( $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м) між смугами випромінювання газів. Функцію оптичної спектральної фільтрації для виділення сигналів на фоні переешкод виконує селективний приймач потоку випромінювання. Спектральний діапазон чутливості приймача збігається за довжиною хвилі з діапазоном вимірювання потоку випромінювання частинок вуглецю (сажі). Це дало можливість не використовувати інтерференційні фільтри в оптичній системі приладу. Фокусування енергії випромінювання на чутливому елементі приймача випромінювання реалізується оптичною системою. Елементами об'єктива спрощеного*

*пірометра є прозора лінза, діафрагма, оптичний фільтр. Як матеріалу лінзи використано прозоре скло марки К8. Виконано розрахунок поля зору оптичної системи. Розмір майданчика візування –  $d_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  м. Виконано розрахунок фокусних відстаней оптичної системи ( $f_1 = 60 \cdot 10^{-3}$  м;  $f = 50 \cdot 10^{-3}$  м). Коефіцієнт пропускання потоку випромінювання в оптичній системі пірометра дорівнює добутку коефіцієнта пропускання лінзи та коефіцієнта пропускання світлофільтра ( $\tau_o = 0,823$ ).*

**Ключові слова:** потік випромінювання, тверді частинки, пірометр, вимірювальний прилад, оптична система, приймач випромінювання.

**Вступ.** Контролюючи стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші пального необхідно визначати хімічний склад продуктів згорання цієї суміші. Застосування газоаналізаторів і хроматографів вимагає багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого персоналу для проведення контролю. Тому удосконалення засобу контролю витрат кисню в пальній суміші пального, є актуальною задачею.

В роботі [1] встановлено, що головним джерелом випромінювання продуктів згорання газоподібних палив є молекули вуглекислого газу та води. Енергія їх випромінювання зосереджена в спектральних смугах з максимумами випромінювання, що відповідають довжинам електромагнітних хвиль 1,38, 1,87, 1,9, 2,7, 4,3, 6,3 та 15 мікрометрів. Частинки сажі мають суцільний спектр випромінювання, так як випромінюють енергію всіх довжин хвиль в видимому та інфрачервоному діапазонах спектру. Визначено діапазон вимірювання потоку випромінювання твердих частинок в області спектру електромагнітних коливань з довжиною хвилі від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м, який дає можливість застосовувати оптико-електронні прилади (ОЕП), в конструкцію яких не входять інтерференційні фільтри, позаяк в цій області спектра газу прозорі [1].

Структура оптичної системи приладу за активного методу роботи складається з двох частин: з передавальної та приймальної системи. У разі пасивного методу роботи узагальнена схема оптичної системи може бути представлена тільки приймальною частиною [2].

*Метою статті є спрощення засобу контролю витрат кисню із застосуванням нескладної інструментальної бази.*

**Структурна реалізація ОЕП.** Для здійснення теплового контролю використано контрольований об'єкт, первинний вимірювальний перетворювач та блоки загального характеру. Розробляючи структурну

схему ОЕП, враховано, що двофазний струмінь газ-тверді частинки газового пальника є потужним тепловим випромінювачем, та визначено пасивний метод теплового контролю, який передбачає використання теплоти самого контрольованого об'єкта.

З метою спрощення структурної схеми ОЕП і забезпечення простоти та надійності його конструкції застосовано прямий прийом оптичного випромінювання, який передбачає безпосередню реєстрацію енергії, що падає на приймач. Приймач випромінювання представлено лінійним детектором, так як розглядається перетворення інтенсивності оптичного випромінювання у фотострум.

Вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю, що знаходяться в полум'ї газового пальника, виконують у вузькому спектральному діапазоні електромагнітних хвиль ( $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м) між смугами випромінювання газів. Крім того, за приймач випромінювання вибрано кремнієвий фотодіод, який є селективним і його спектральна область чутливості від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м, збігається по довжині хвилі з діапазоном вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю. Оскільки функцію оптимальної оптичної спектральної фільтрації для виділення сигналів на тлі перешкод виконує приймач потоку випромінювання, то це дає можливість спростити структурну реалізацію ОЕП, не застосовуючи інтерференційні фільтри (рис. 1).

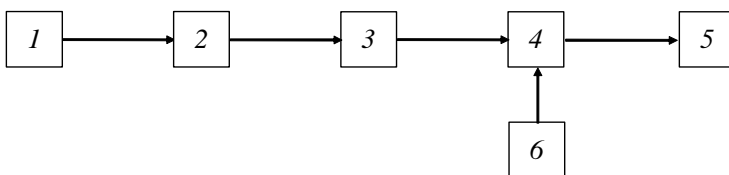


Рис. 1. Структурна схема спрощеного ОЕП з пасивним методом роботи:

1 – оптичний фільтр; 2 – лінза; 3 – приймач потоку випромінювання; 4 – електронний підсилювач сигналу; 5 – вольтметр; 6 – блок живлення

Оптичний фільтр призначений для послаблення потоку випромінювання з метою захисту приймача від надмірно великих засвічувань. Крім того, оптичний фільтр виконує функцію захисту лінзи

об'єктива від забруднення частинками пилу та сажі, що знаходяться в повітрі робочої зони.

Для підсилення фотоструму застосовано електронний підсилювач сигналу. Живлення активних елементів підсилювача забезпечується біполярним джерелом живлення постійного струму з напругою 9 В. Як індикатор сигналу застосовано вольтметр магнітоелектричної системи з шкалою проградуйованою в умовних одиницях вимірювання або вольтах.

**Проектування приймальної системи ОЕП.** При вимірюванні потоку випромінювання двофазного струменя продуктів згорання пальної суміші випромінювачем є сам струмінь високотемпературних газів. Звідси визначено метод роботи ОЕП – пасивний. Високотемпературний струмінь продуктів згорання газового пальника є лінійним випромінювачем, так як його розміри перевищують розміри майданчика візування.

Для фокусування енергії випромінювання в ОЕП необхідно виконати такі умови: одержання мінімального розміру фоточутливого шару із заданим полем зору ОЕП; сполучення площини чутливого елемента з проекцією вхідного вікна об'єктива, що створює рівномірне опромінення по всьому фотозару. Фокусування енергії випромінювання в оптичній схемі ОЕП на чутливому елементі приймача випромінювання здійснюється оптичною системою, яка складається з однолінзового об'єктива, до складу якого входять: прозора лінза, діафрагма, оптичний фільтр [2].

Відповідно до діапазону вимірювання (інтервал довжин хвиль  $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$  м), як матеріал лінзи застосовано прозоре скло марки К8. Вибраний матеріал має такі параметри: робоча зона спектра –  $0,4 \cdot 10^{-6} \dots 2,0 \cdot 10^{-6}$  м; коефіцієнт відбивання на границі матеріал-повітря  $\rho = 0,0411$ ; показник заломлення  $n_D = 1,5084$ . Показники  $\rho$  та  $n_D$  враховані для довжини хвилі  $0,91 \cdot 10^{-6}$  м, так як максимум спектральної чутливості кремнієвих фотодіодів при довжині хвилі  $0,8 \cdot 10^{-6}$  м. За матеріал світлофільтра вибрано червоне скло типу КС.

Поле зору ОЕП лінзового типу визначено по схемі, показаній на рис. 2.

Відповідно до теорії тонкої лінзи з головною фокусною відстанню  $f$ , яка знаходиться на відстані  $f_2$  від круглого об'єкта діаметром  $d_2$ , формується зображення цього об'єкта діаметром  $d_1$  на відстані  $f_1$  від лінзи [3], [4]. При цьому справедливе співвідношення

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}, \quad \frac{d_2}{d_1} = \frac{f_2}{f_1}. \quad (1)$$

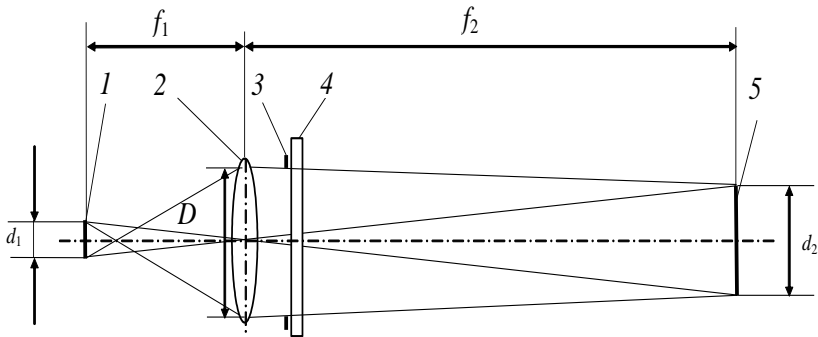


Рис. 2. Схема визначення поля зору ОЕП лінзового типу:

1 – майданчик чутливого елемента приймача; 2 – лінза; 3 – діафрагма; 4 – світлофільтр; 5 – майданчик візування;  $f_1$  – відстань від лінзи до зображення об'єкта;  $f_2$  – відстань від лінзи до об'єкта

З формул (1) можна визначити відстані  $f_1$  та  $f_2$  за виразами:

$$f_1 = \frac{d_1 \cdot f_2}{d_2}, \quad f_2 = \frac{f_2 \cdot f_1}{f_2 + f_1}. \quad (2)$$

Так як струмінь продуктів згорання пальної суміші пальника є потужним тепловим лінійним випромінювачем, то з метою недопущення нагрівання ОЕП відстань від ОЕП до поверхні струменя вважатимемо  $f_2 = 0,3$  м, а розмір майданчика візування –  $d_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  м.

Площа  $S$  чутливого елемента фотодіода ФД-25К становить  $2 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Чутливий елемент фотодіода виготовлений в формі квадратної пластини з розміром сторони квадратної пластини  $a = (1,41 \cdot 10^{-3} \dots 1,73 \cdot 10^{-3})$  м. З метою використання всієї енергії випромінювання з майданчика візування розмір проекції об'єкта на чутливому елементі прийнято меншим за розмір сторони квадратної пластини, а саме  $d_1 = 1$  мм. Після підстановки числових значень  $d_2$ ,  $d_1$  та  $f_2$  в формули (2) визначено відстані оптичної системи:  $f_1 = 60 \cdot 10^{-3}$  м;  $f_2 = 50 \cdot 10^{-3}$  м.

Радіус кривизни поверхні  $R$  лінзи, лінійне збільшення  $\beta$  лінзи і оптичну силу  $F$  системи визначені за формулами:



$$R = f(n-1), \quad \beta = \frac{d_1}{d_2}, \quad F = \frac{n}{f_1}, \quad (3)$$

де  $n$  – коефіцієнт заломлення середовища [3].

Після підстановки числових значень отримано:  $R = 25,42 \cdot 10^{-3}$  м;  $\beta = 0,2$ ;  $F = 0,01666$ .

Діаметр вхідного отвору оптичної системи визначено за формулами:

$$D = 2 \cdot h, \quad h = \operatorname{tg} \alpha \cdot f_1, \quad (4)$$

де  $h$  – відстань від оптичної осі до краю вхідного отвору оптичної системи;  $\alpha$  – кут між оптичною віссю та променем, що проходить від краю вхідного отвору до точки перетину зображення з оптичною віссю (рис. 3) [3, 5].

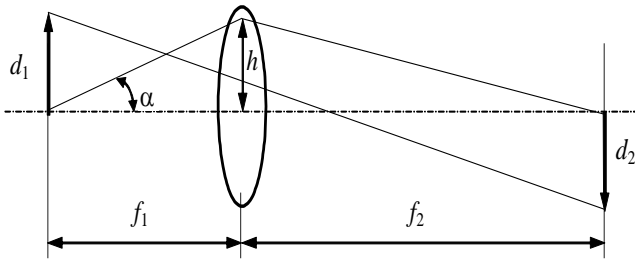


Рис. 3. Заломлення променя сферичною поверхнею

Вибрано кут  $\alpha = 9,5^\circ$ . Тоді  $h = 10,02 \cdot 10^{-3}$  м,  $D = 20,04 \cdot 10^{-3}$  м. Прийнято  $D = 20 \cdot 10^{-3}$  м. Діаметр лінзи взято рівним  $23 \cdot 10^{-3}$  м.

**Визначення коефіцієнта пропускання потоку випромінювання оптичної системи ОЕП.** Оптична система ОЕП складається з лінзи з прозорого скла марки К8 та світлофільтра марки КС. Для кількісної оцінки використано коефіцієнти відбивання  $\rho$ , поглинання  $\alpha$  та пропускання  $\tau$ , які зв'язані рівністю

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \quad (5)$$

Коефіцієнт відбивання  $\rho$  визначено за формулою

$$\rho = \left[ \frac{(n' - n)}{(n' + n)} \right]^2, \quad (6)$$

де  $n, n'$  – показники заломлення першого та другого середовища [5, 6].

Показник заломлення матеріалу лінзи (скло марки К8) для довжини хвилі  $0,6943 \cdot 10^{-6}$  м  $n' = 1,512$  [7]. Показник заломлення повітря (довжина хвилі  $\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6}$  м)  $n = 1,0002716$  [8]. Показники  $\rho$  та  $n'$  дані для довжини хвилі  $0,6943 \cdot 10^{-6}$  м, так, як максимум спектральної чутливості кремнієвого фотодіода ФД-25К за довжини хвилі близько  $0,8 \cdot 10^{-6}$  м). Підставляючи числові значення  $n$  та  $n'$  в формулу (6) отримано:  $\rho = 0,0414902$ .

За даними джерела [7] коефіцієнт відбивання  $\rho$  на межі скло марки К8 – повітря (довжина хвилі  $0,6943 \cdot 10^{-6}$  м) дорівнює  $0,0417$ . Коефіцієнт пропускання  $\tau_\rho$  враховує тільки втрати на відбивання, тобто  $\tau_\rho = (1 - \rho)$  і дорівнює  $\tau_\rho = 0,9585$ . Коефіцієнт пропускання  $\tau_\alpha$  враховує тільки втрати на поглинання

$$\tau_\alpha = (1 - \alpha)^l, \quad (7)$$

де  $l$  – сумарна довжина ходу променів вздовж осі в лінзі у сантиметрах [6].

Коефіцієнт поглинання  $\alpha$  залежить від категорії скла по світлопоглинанню і коливається в межах від  $0,4$  до  $1,5$  %. У наближених підрахунках прийнято  $\alpha = 0,01 = 1$  % на  $0,01$  м ходу променя [6]. Прийнято  $\alpha = 0,01$ . Довжина ходу променів вздовж осі в лінзі  $l = 4 \cdot 10^{-3}$  м. Підставляючи числові значення  $\alpha$  та  $l$  в формулу (7) отримано:  $\tau_\alpha = 1,0306$ . Коефіцієнт пропускання лінзи, що враховує тільки втрати на відбивання при заломленні і поглинання визначено за формулою

$$\tau = \prod_{v=1}^{v=k} (1 - \rho_v) \prod_{v=1}^{v=k-1} (1 - \alpha_v)^{l_v} \quad (8)$$

і становить  $\tau = 0,9468$ .

В оптичній системі застосовано світлофільтр марки КС, його коефіцієнт пропускання визначено з виразу  $\tau_1 = 1/k$ , де  $k$  – кратність фільтра [6] і при  $k = 1,15$  отримано:  $\tau_1 = 0,86956$ .

Коефіцієнт пропускання потоку випромінювання в оптичній системі ОЕП дорівнює добутку коефіцієнта пропускання лінзи та коефіцієнта пропускання світлофільтра і становить  $\tau_0 = 0,823$ .

**Перевірка умови повного використання енергії випромінювання приймачем.** Проектуючи ОЕП, необхідно виконати умову повного використання енергії випромінювання приймачем, а саме умови виконання нерівності

$$2\alpha_r > 2\sigma_{os}, \quad (9)$$

де  $2\alpha_r$  – плоский апертурний кут приймача випромінювання;  $2\sigma_{os}$  – повний апертурний кут оптичної системи ОЕП (рис. 4) [9].

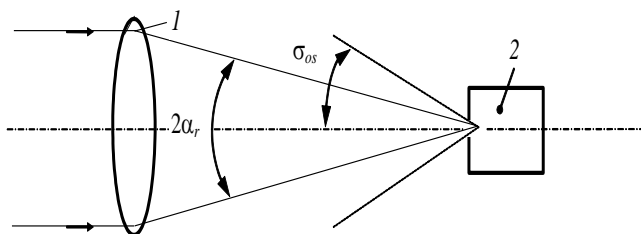


Рис. 4. Апертурні кути оптичної системи 1 та приймача випромінювання 2 [9]

Апертурний кут  $2\alpha_r$  обмежений встановленою діафрагмою в оптичній системі ОЕП. Зі схеми формування апертури приймача випромінювання (рис. 5) при кінцевому значенні довжини  $a$  фоточутливого майданчика максимальний та ефективний апертурні кути визначено за виразами:

$$2\alpha_r^{\max} = 2\arctg \frac{d+a}{2x}, \quad 2\alpha_r = 2\arctg \frac{d-a}{2x}, \quad (10)$$

де  $d$  – діаметр діафрагми приймача;  $x$  – відстань від діафрагми до чутливого елемента [9]. Після підстановки числових значень в формулу (10) отримано:  $2\alpha_r^{\max} = 45^\circ$ ,  $2\alpha_r = 27^\circ$ . Звідси  $\alpha_r = 13,5^\circ$ .

Апертурний кут  $\sigma_{os}$  в просторі предметів та апертурний кут  $\sigma_{os1}$  в просторі зображень визначено відповідно за формулами:

$$\operatorname{tg}\sigma = D \cdot f_2 / 2, \quad \operatorname{tg}\sigma_1 = D \cdot f_1 / 2, \quad (11)$$

де  $D$  – діаметр вхідного отвору оптичної системи [3].

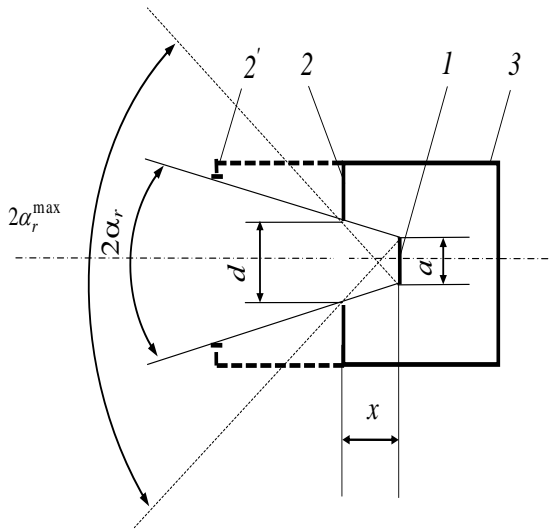


Рис. 5. Апертурні кути приймача випромінювання:  
1 – чутливий майданчик; 2, 2' – діафрагми; 3 – корпус [9]

Після підстановки числових значень  $D$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  в формули (11) отримано:  $\operatorname{tg}\sigma = 0,033$ ;  $\sigma = 1,9^\circ$ .  $\operatorname{tg}\sigma_1 = 0,166$ ;  $\sigma_1 = 9,5^\circ$ . Для світлосильних оптичних систем, що мають  $\sigma_{os1} = 30 \dots 35^\circ$ , різницю  $\alpha_r - \sigma_{os1}$  вибирають в межах  $2 \dots 5^\circ$ . Прийнято різницю  $\alpha_r - \sigma_{os1} = 4^\circ$ . Тоді  $\sigma_{os1} = 9,5^\circ$ . Підставляючи числові значення в нерівність (9) отримано:  $2 \cdot 13,5^\circ > 2 \cdot 9,5^\circ$ . Позаяк нерівність (9) виконується, то енергія випромінювання повністю використовується приймачем.

## Висновки

1. Позаяк полум'я газового пальника є потужним тепловим лінійним випромінювачем, то це дало можливість застосувати пасивний метод роботи оптико-електронного приладу.

2. Завдяки застосуванню прямого прийому оптичного випромінювання полум'я газового пальника спрощено структурну схему оптико-електронного приладу вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю у високотемпературному двофазному потоці газ-тверді частинки.

3. Функцію оптимальної оптичної спектральної фільтрації при виділенні сигналів на тлі перешкод виконує селективний приймач потоку випромінювання. Застосування селективного приймача випромінювання дало можливість обмежити спектральний діапазон вимірювання потоку випромінювання полум'я спектральною чутливістю приймача випромінювання (довжина хвилі від  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  м). Це дало можливість не використовувати інтерференційних фільтрів в оптичній системі приладу, а відтак спростити останню і вимірювальний прилад в цілому.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Ночвай В. М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки / В. М. Ночвай // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць ЖДТУ. – 2006. – № 4. – С. 69-76.

2. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения : учеб. для вузов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Сов. радио, 1977. – 272 с.

3. Гвоздева Н. П. Прикладная оптика и оптимальные измерения / Н. П. Гвоздева, К. И. Коркина. – М. : Машиностроение, 1976. – 383 с.

4. Поль Р. В. Оптика и атомная физика / Поль Р. В. ; пер. с нем. Н. М. Лозонской ; под ред. Н. А. Толстого. – М. : Наука, 1966. – 552 с.

5. Сакин И. Л. Инженерная оптика / И. Л. Сакин. – Л. : Машиностроение, 1976. – 288 с.

6. Апенко М. И. Прикладная оптика / М. И. Апенко, А. С. Дубовик. – М. : Наука, 1971. – 392 с.

7. Климов Ю. М. Основы расчёта оптико-электронных приборов с лазерами / Ю. М. Климов. – М. : Сов. радио, 1978. – 264 с.

8. Хауф В. Оптические методы в теплопередаче / В. Хауф, У. Григуль ; пер. с англ. А. Н. Вишнякова и И. В. Орфанова ; под ред. проф. В. Я. Лихушина. – М. : Мир, 1973. – 240 с.

9. Справочник по приёмникам оптического излучения / [В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гасанов и др.] ; под ред. Л. З. Криксунова и Л. С. Кременчугского. – К. : Техніка, 1985. – 216 с.

## ПЕРЕЛІК ПАТЕНТІВ НА ВИНАХОДИ

1. Пат. 026771 (РОСПАТЕНТ), МПК В 23 В 1/00. Спосіб определения оптимального припуску / Багинский А. Ф., Полонский Л. Г., Антонов С. Н., Мошинский В. В., Ночвай В.М.; заявитель Житомирский филиал Киевского политехнического института; патентообладатель Житомирский региональный фонд поддержки предпринимательства и развития конкуренции. – № 4933704/08; заявл. 05.05.91 ; опубл. 20.01.95, Бюл. № 2. – 3 с.

2. Пат. 75542 Україна, МПК G 01 F 3/00. Спосіб визначення оптимальної дистанції напилювання покриттів / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041108891 ; заявл. 01.11.04 ; опубл. 17.04.06, Бюл. № 4. – 4 с.

3. Пат. 76332 Україна, МПК F 23 N 1/02. Спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041008025 ; заявл. 04.10.04 ; опубл. 17.07.06, Бюл. № 7. – 4 с.

4. Пат. 77518 Україна, МПК G 01 F 1/76; G 05 D 11/00. Спосіб вимірювання витрат твердих часток у високотемпературному газовому потоці / Ночвай В. М., Серов В. В. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 20041109124 ; заявл. 08.11.04 ; опубл. 15.12.06, Бюл. № 12. – 5 с.

5. Пат. 100332 Україна, МПК В 23 В 1/00. Спосіб визначення припуску на механічну обробку виробів з газотермічними покриттями / Кравченко М. П., Полонський Л. Г., Ночвай В. М., Лошенко В. О., Степчин О. А. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. технол. ун-т. – № 2011 11957 ; заявл. 11.10.2011 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23. – 4 с.

6. Пат. 108418 Україна, МПК В 23 В 1/00. Спосіб отримання заданої шорсткості оброблених різанням поверхонь виробів із газотермічними напиленими покриттями / Кравченко М. П., Полонський Л. Г., Ночвай В. М., Щехорський А. Й., Козаков О. С., Дажук О. І., Радчук Ю. Л. ; заявник і патентовласник Житомир. держ. техн. ун-т. – № 201309694 ; заявл. 05.08.2013 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 5 с.

7. Пат. 100846 Україна, МПК G 01 В 5/06. Спосіб вибору оптимальної робочої товщини зносостійкого покриття / Клименко С. А., Полонський Л. Г., Ночвай В. М., Бурикін В. В., Яновський В. А., Піскуп Я. В.; заявник і патентовласник Житомир. держ. техн. ун-т. – № 201502072 ; заявл. 21.04.2015 ; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. – 4 с.

## ЗМІСТ

Передмова .....	3
Вступ .....	4
<b>Частина 1. Методики досліджень</b> .....	<b>6</b>
1. Методика перерахунку градувальної характеристики ротаметра .....	6
2. Оптико-електронний прилад «Вуглець» .....	11
2.1. Призначення приладу .....	11
2.2. Основні технічні характеристики ОЕП «Вуглець» .....	11
2.3. Основні переваги розробленого приладу .....	12
3. Методика вимірювання потоку випромінювання твердих частинок .....	13
4. Методика дослідження швидкодії контролю витрат кисню пальника .....	19
4.1. Постановка задачі .....	19
4.2. Планування експерименту .....	19
4.3. Проведення експерименту .....	21
4.4. Статистична обробка результатів експерименту .....	22
4.5. Перевірка гіпотези підпорядкування відхилень результатів вимірювань нормальному закону розподілу .....	24
4.6. Висновки .....	30
5. Методика дослідження вірогідності контролю витрат кисню пальника .....	31
<b>Частина 2. Публікації</b> .....	<b>35</b>
<b>В.М. Ночвай, В.В. Сєров, А.Г. Тютюнник.</b> Визначення дистанції газополуменевого напилювання .....	35
<b>А.И. Тютюнник, А.Н. Коваль, Д.Е. Плечистый, В.М. Ночвай.</b> О методе построения дизелькометрических влагомеров, инвариантных к активным потерям .....	36

<b>В.В. Серов, В.М. Ночвай.</b> Випромінювання двофазного струменя та його зв'язок з параметрами напилювання .....	41
<b>В.М. Ночвай.</b> Дослідження випромінювання двофазного потоку газ-тверді частинки .....	46
<b>В.М. Ночвай.</b> Встановлення зв'язку між напругою на виході пірометра та світимістю твердих частинок двофазного потоку газ-тверді частинки .....	53
<b>В.М. Ночвай.</b> Метод експрес-пошуку оптимальних параметрів газополуменевого напилювання покриттів .....	57
<b>В.М. Ночвай, В.Г. Петрук.</b> Технологічні особливості методу контролю оптимальних параметрів газополуменевого напилювання покриттів .....	58
<b>В.М. Ночвай, В.Г. Петрук.</b> Дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок .....	62
<b>В.М. Ночвай.</b> Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я .....	74
<b>В.Г. Петрук В.Г, С.М. Кватернюк, О.Є. Кватернюк, В.М. Ночвай.</b> Метод контролю стану полідисперсних водних середовищ за спектрополяриметричними зображеннями завислих частинок .....	85
<b>В.М. Ночвай.</b> Визначення меж допускового інтервалу для значення інформативного параметра при контролі витрат кисню пальника .....	95
<b>В.М. Ночвай.</b> Дослідження радіаційних характеристик твердих частинок вуглецю полум'я газового пальника .....	102
<b>В.М. Ночвай.</b> Технологічні особливості методу контролю витрат кисню пальника .....	109
<b>В.М. Ночвай, В.Г. Петрук.</b> Екологічно чиста технологія спалювання палива .....	119
<b>В.М. Ночвай.</b> Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я при спалюванні пропан-бутану .....	125
<b>В.М. Ночвай, Л.Г. Полонський, В.В. Серов, Р.В. Карплюк.</b> Засіб контролю стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу у пальній суміші пальника .....	133



<b>В.М. Ночвай.</b> Проектування та дослідження електронного блоку пірометра для вимірювання потоку випромінювання твердих частинок в двофазному потоці .....	138
<b>В.М. Ночвай.</b> Проектування та дослідження оптичної системи пірометра для вимірювання потоку випромінювання твердих частинок в двофазному потоці .....	148
Перелік патентів на винаходи .....	158

*Наукове видання*

**Ночвай Володимир Матвійович**

# **КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ДВОФАЗНИХ ПОТОКІВ**

**Збірник наукових праць**

Електронне видання

Редакційно-видавничий відділ  
Державного університету «Житомирська політехніка»

Державний університет «Житомирська політехніка»  
Адреса: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103