

## МЕТОД ЕКСПРЕС-ПОШУКУ СТЕХІОМЕТРИЧНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ КИСНЮ ТА ГОРЮЧОГО ГАЗУ В ГОРЮЧІЙ СУМІШІ ПАЛЬНИКА

(Представлено д.т.н., проф. Мельничуком П.П.)

*В роботі виконано аналіз методів пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пального. Розроблено та досліджено метод експрес-пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пального.*

**Актуальність та постановка проблеми.** Для якісного проведення технологічних процесів газового зварювання, газополуменевого напильовання 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 горючій суміші залежить тип полум'я, його ефективна потужність і температура. Регулювання витрат кисню та горючого газу в горючій суміші пального візуально за виглядом полум'я призводить до значних похибок [2].

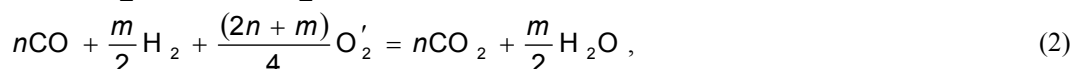
Відомий спосіб контролю та регулювання полум'я газових пальників шляхом визначення парціального тиску  $\text{CO}_2$  за виміром абсолютної величини спектральної інтенсивності смуги випромінювання  $\text{CO}_2$  [3]. При цьому необхідно проводити складні випробування з підтриманням параметрів полум'я 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 у вимірювання додаткову похибку. Величину парціального тиску визначають за допомогою громіздкої формули, що містить емпіричні коефіцієнти, в результаті чого контроль співвідношення кисню та горючого газу неможливо проводити оперативно та вчасно реагувати на його зміну.

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

Тому розробка методу експрес-пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пального є актуальною задачею.

**Мета досліджень.** Спростити обладнання та прилади, скоротити час пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пального.

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

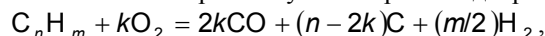


де  $\text{C}_n\text{H}_m$  – хімічна формула горючого газу;

$\text{O}_2$  – кисень горючої суміші;

$\text{O}'_2$  – кисень, що надходить з навколишнього повітря.

При недостатці кисню в горючій суміші перша стадія реакції горіння проходить за схемою:



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

При цьому  $k < n/2$ , за межами ядра полум'я знаходяться продукти горіння  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  та тверді частинки сажового вуглецю. Чим більша концентрація частинок сажі в полум'ї, тим більша його енергетична світлимість. Частинки сажі випромінюють як тверді тіла та мають суцільний спектр випромінювання з досить високим коефіцієнтом чорноти.

Контроль сажового вуглецю за межами ядра полум'я виконано шляхом вимірювання потоку випромінювання твердих частинок сажового вуглецю в спектральному діапазоні електромагнітних хвиль, який не співпадає по довжині електромагнітних хвиль зі смугами випромінювання газів, які входять до складу газоподібних продуктів полум'я [5].

Енергетичну світимість полум'я з однією частинкою вуглецю визначено за виразом:

$$M_{\text{ест}} = \varepsilon_T \cdot M_e,$$

де  $M_e$  – енергетична світимість абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon_T$  – повний коефіцієнт випромінювання сажового вуглецю.

Енергетичну світимість полум'я з частинками сажового вуглецю в кількості  $b$ , які знаходяться в полі зору пірометра, визначено за виразом:

$$M_{\text{ест}} = b \cdot \varepsilon_T \cdot M_e. \tag{3}$$

При стехіометричному співвідношенні кисню та горючого газу в горючій суміші газу згорають без залишку (формули (1) та (2), за межами ядра полум'я твердих частинок сажового вуглецю немає. Тоді при підстановці значення  $b$  у формулу (3) отримано:

$$M_{\text{ест}} = 0 \cdot \varepsilon_T \cdot M_e = 0.$$

Звідси, при відсутності твердих частинок сажового вуглецю за межами ядра полум'я пальника потік випромінювання та напруга на виході пірометра дорівнюють нулю.

При постійних витратах горючого газу збільшували витрати кисню і вимірювали потік випромінювання сажового вуглецю. Стехіометричне співвідношення кисню та горючого газу визначено за спадом до нуля потоку випромінювання сажового вуглецю (рис. 1).

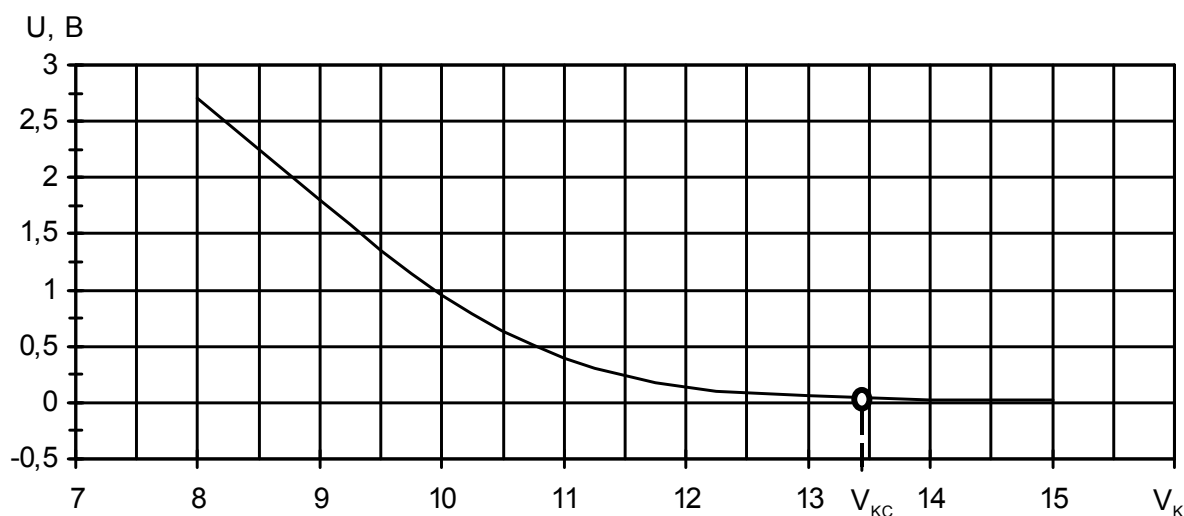


Рис. 1. Залежність напруги на виході пірометра від витрат кисню

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

$$U = f(V_k), \tag{4}$$

де  $U$  – напруга на виході пірометра;

$V_k$  – витрати кисню.

Першу похідну  $U'$  функції (4) визначено за виразом:

$$U' = \frac{dU}{dV_k} = f'(V_k). \tag{5}$$

Оскільки перша похідна функції при жодному значенні аргументу  $V_k$  не дорівнює нулю (табл. 1), то необхідна умова існування екстремуму функції  $U = f(V_k)$  не виконується.

Таблиця 1

Результати розрахунків значення функції (4) та її першої похідної

| Номер досліджу, $i$ | Значення                  |                   |                            | Номер досліджу, $i$ | Значення                  |                   |                            |
|---------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------|
|                     | аргументу $V_{ki}$ , л/хв | функції $U_i$ , В | першої похідної $U'_i$ , В |                     | аргументу $V_{ki}$ , л/хв | функції $U_i$ , В | першої похідної $U'_i$ , В |
| 1                   | 8                         | 2,69              | -0,532                     | 5                   | 12                        | 0,14              | -0,16                      |
| 2                   | 9                         | 1,79              | -0,996                     | 6                   | 13                        | 0,04              | -0,046                     |
| 3                   | 10                        | 0,93              | -0,701                     | 7                   | 14                        | 0,02              | -0,003                     |
| 4                   | 11                        | 0,4               | -0,377                     | 8                   | 15                        | 0,02              | -0,004                     |

З метою застосування крокового методу пошуку необхідно вихідну функцію (4) перетворити у функцію, яка має екстремум. Для цього спочатку перетворено першу похідну шляхом введення в рівняння (5) постійної складової  $c$ :

$$U'_n = f'(V_k) + c, \tag{6}$$

де  $U'_n$  – перетворена перша похідна функції.

Постійну складову  $c$  визначено за виразом:

$$c = -U'_c,$$

де  $U'_c$  – значення першої похідної неперетвореної функції в точці  $V_{kc}$ ;

$V_{kc}$  – розрахункове значення витрат кисню.

Розрахункове значення витрат кисню визначено за виразом:

$$V_{kc} = v_c \cdot V_g, \tag{7}$$

де  $v_c$  – коефіцієнт стехіометричного співвідношення витрат кисню та горючого газу;

$V_g$  – значення витрат горючого газу.

Коефіцієнт  $v_c$  визначають по довідникових таблицях [2, 6]. Значення першої похідної функції в точці  $a$  (рис. 3) визначено за виразом:

$$U'_c = f'(V_{kc}).$$

Функцію (4) перетворено шляхом інтегрування перетвореної першої похідної:

$$U_n = \int [f'(V_k) + c] V_k = f(V_k) + c \cdot V_k. \tag{8}$$

Після виконаних операцій перетворення отримано перетворену функцію (8), яка в точці  $V_{kc}$  має екстремум (рис. 2), а перетворена перша похідна дорівнює нулю (рис. 3).

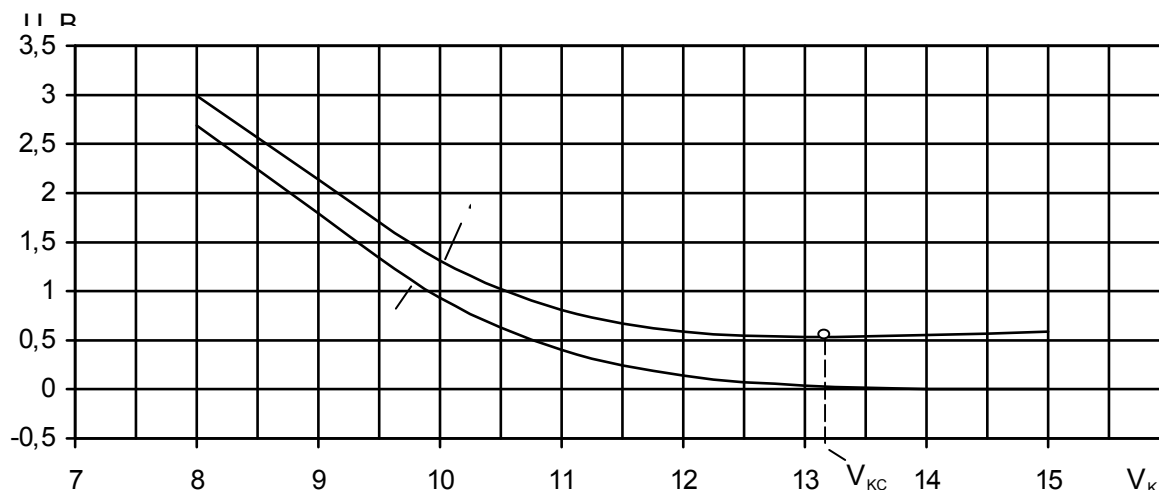


Рис. 2. Функція  $U = f(V_k)$ :

1 – до перетворення; 2 – після перетворення

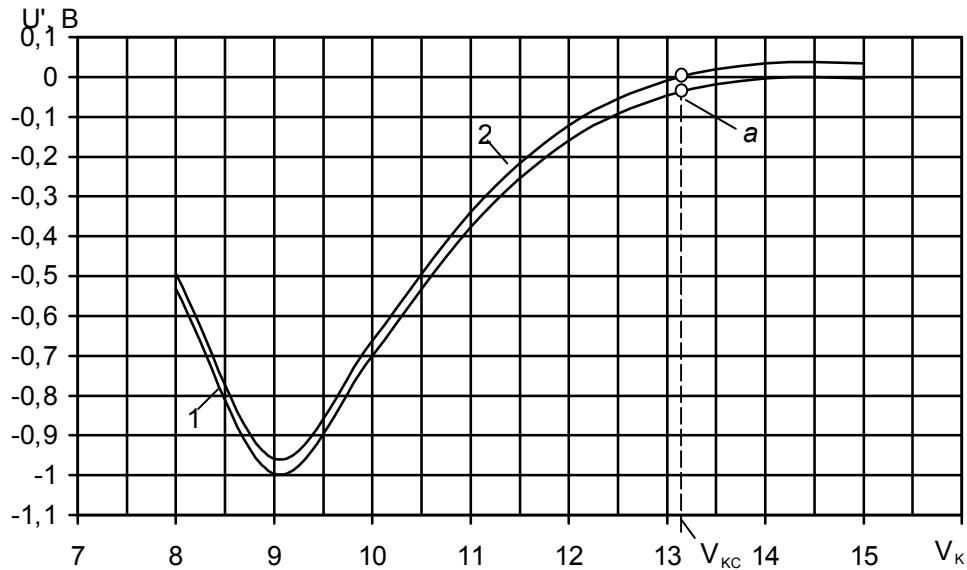


Рис. 3. Перша похідна  $U' = f'(V_k)$  :  
 1 – до перетворення; 2 – після перетворення

Значення перетвореної функції (8) не використовують при виконанні пошуку значення витрат кисню, а виконано з метою отримання значення постійної складової  $c$ .

При відсутності математичної моделі технологічного процесу формування полум'я пальника значення постійної складової  $c$  визначають за виразом:

$$c = -\Delta U_c,$$

де  $\Delta U_c$  – значення різниці напруги в точці  $V_{кc}$ .

Розрахункове значення витрат кисню  $V_{кc}$  визначено за формулою (7). Тоді значення різниці напруги  $\Delta U_c$  знаходиться між значеннями різниць напруг  $\Delta U_i$  та  $\Delta U_{i-1}$ .

Значення різниць напруг  $\Delta U_i$  та  $\Delta U_{i-1}$  визначено відповідно за формулами:

$$\Delta U_i = U_i - U_{i-1}; \quad \Delta U_{i+1} = U_{i+1} - U_i,$$

де  $\Delta U_i$  – різниця напруги  $i$ -го та  $(i-1)$ -го кроку пошуку;

$U_i$  – значення напруги на виході пірометра  $i$ -го кроку пошуку;

$U_{i-1}$  – значення напруги на виході пірометра  $(i-1)$ -го кроку пошуку;

$\Delta U_{i+1}$  – різниця напруги  $i$ -го та  $(i + 1)$ -го кроку пошуку;

$U_{i+1}$  – значення напруги на виході пірометра  $(i + 1)$ -го кроку пошуку;

$i$  – номер кроку пошуку.

За отриманими значеннями  $\Delta U_i$  та  $\Delta U_{i+1}$  побудовано криву залежності різниці напруги  $\Delta U$  від витрат кисню  $V_k$ :  $\Delta U_i$  – точка  $a$ ;  $\Delta U_{i+1}$  – точка  $b$  (рис. 4). Значення різниці напруги  $\Delta U_c$  (точка  $d$ ) визначено графічним методом.

Пошук значення витрат кисню в точці екстремуму функції виконано кроковим методом.

При постійних витратах горючого газу  $V_n$  змінювали витрати кисню  $V_k$  з кроком  $h$ . Початковий напрям руху робочої точки за характеристикою об'єкта вибрано в сторону збільшення  $V_k$ . При виконанні кожного кроку пошуку виконано вимірювання витрат кисню та напруги на виході пірометра. Після цього визначено різницю напруги  $i$ -го та  $(i - 1)$ -го кроків за формулою:

$$\Delta U_i = U_i - U_{i-1} + c.$$

Різниця напруг  $\Delta U_i$  є критерієм вибору напрямку руху робочої точки за характеристикою об'єкта для виконання наступного кроку. Якщо  $\Delta U_i < 0$ , то напрям руху залишають без змін, якщо  $\Delta U_i > 0$ , то напрям руху змінюють на протилежний.

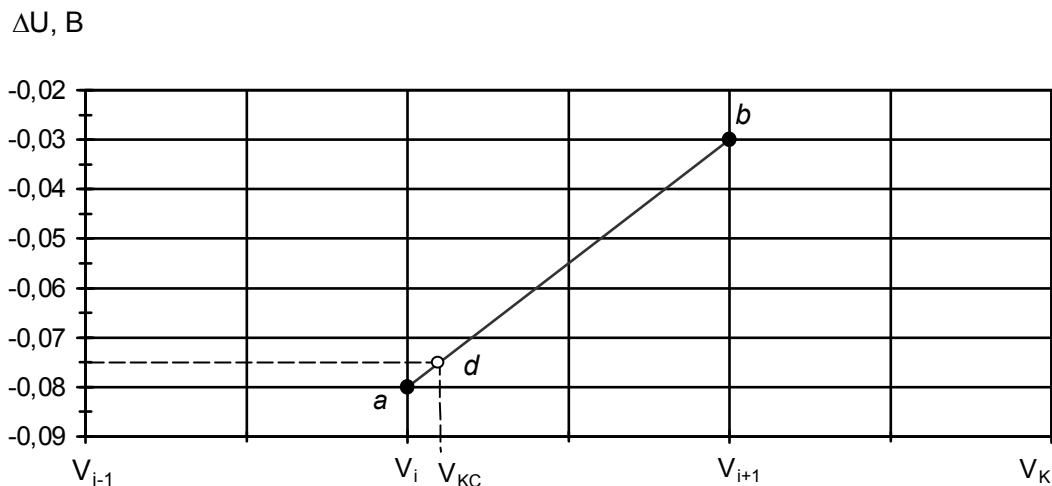


Рис. 4

В сталому стані коливальні рухи робочої точки за характеристикою об'єкта здійснюються навколо точки екстремуму від точки *a* до точки *b* (рис. 5).

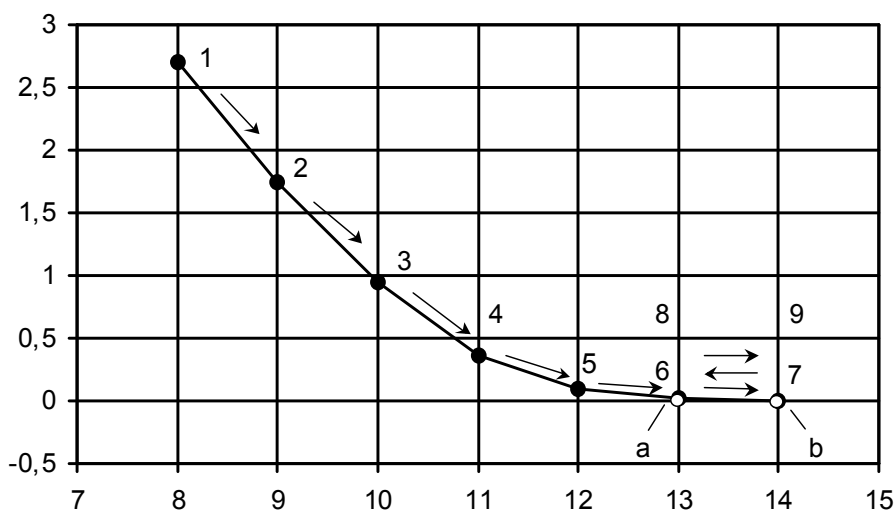


Рис. 5. Результати пошуку витрат кисню в точці екстремуму функції:  
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 – номери кроку пошуку

Значення витрат кисню в точці екстремуму прийнято як середнє арифметичне значення витрат кисню в точках, між якими здійснюються в сталому стані коливальні рухи робочої точки за характеристикою об'єкта і дорівнює для першого пошуку 13,5 л/хв.

За результатами 11 повторних пошуків визначено значення витрат кисню в точці екстремуму функції (табл. 2).

Таблиця 2

Значення витрат кисню в точці екстремуму функції при повторних пошуках

| Номер пошуку, <i>j</i>         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Витрати кисню $V_{кеj}$ , л/хв | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 12,5 | 13,5 | 13,5 | 12,5 | 14,5 | 13,5 | 13,5 |

Значення витрат кисню, яке відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в горючій суміші всього експерименту, визначено як середнє арифметичне значення результатів 11 повторних пошуків витрат кисню в точці екстремуму за формулою:

$$V_{ке} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{кеj},$$

де  $V_{кеj}$  – значення витрат кисню в точці екстремуму  $j$ -го пошуку;

$n$  – кількість повторних пошуків і дорівнює 13,4 л/хв.

Після виконання статистичної обробки результатів експерименту отримано показники точності пошуку значення витрат кисню (табл. 3).

Таблиця 3

Показники точності результатів спостережень та пошуків  
значення витрат кисню в точці екстремуму

| Назва показника точності   | Значення |
|--|----------|
| Середнє квадратичне значення похибки результату спостережень $\sigma$ , л/хв           | 0,54     |
| Похибка середнього арифметичного значення результату спостереження $\epsilon_c$ , л/хв | 1,20     |
| Середнє квадратичне значення похибки результату пошуку $\epsilon_\sigma$ , л/хв        | 0,16     |
| Похибка середнього арифметичного значення результату пошуку $\epsilon_n$ , л/хв        | 0,36     |

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

Розрахунки різниці напруг  $i$ -го та  $(i-1)$ -го кроків та визначення напрямку руху робочої точки за характеристикою об'єкта для виконання наступного кроку прості і не потребують багато часу на їх виконання.

Так, якщо експрес-пошук значення витрат кисню, яке відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та горючого газу в горючій суміші, зводиться до пошуку екстремуму функції, то пошук можна виконувати і в автоматичному режимі з застосуванням системи екстремального регулювання.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ольшанский Н.А.* Сварка в машиностроении: Справочник в 4 т. – М.: Машиностроение, 1978–1979.
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. 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». – 3-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
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); Заявл. 04.10.2004. Опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7.
6. *Нинбург А.К.* Газопламенная обработка металлов с использованием газов-заменителей ацетилена. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.

НОЧВАЙ Володимир Матвійович – викладач кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– газотермічні покриття;

– прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Подано 09.11.2006

Ночвай В.М. Метод експрес-пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пальника

**Ночвай В.М.** Метод експресс-поиска стехиометрического соотношения кислорода и горючего газа в горючей смеси горелки

**Nochvay V.M.** The method express-searching stoichiometric correlation of oxygen and combustible gas in the gas mixture of burner

УДК 621.7.08: 531.733

Метод експрес-пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пальника / В.М. Ночвай

В роботі виконано аналіз методів пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пальника. Розроблено та досліджено метод експрес-пошуку стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в горючій суміші пальника

УДК 621.7.08: 531.733

Метод експресс-поиска стехиометрического соотношения кислорода и горючего газа в горючей смеси горелки / **В.М. Ночвай**

В работе выполнен анализ методов поиска стехиометрического соотношения кислорода и горючего газа в горючей смеси горелки. Разработано и исследовано метод экспресс-поиска стехиометрического соотношения кислорода и горючего газа в горючей смеси горелки

УДК 621.7.08: 531.733

The method express-searching stoichiometric correlation of oxygen and combustible gas in the gas mixture of burner / **V.M. Nochvay**

The analysis of searching methods of stoichiometric correlation of oxygen and combustible gas in the gas mixture of burner is carried out in the research work. The express-searching method of the stoichiometric correlation of oxygen and combustible gas in the gas mixture of burner is developed and investigated.