

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

У роботі теоретично обґрунтовано, розроблено та досліджено метод контролю витрат кисню газового палика 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 ін.) 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 в пальній суміші залежить тип полум'я, його ефективна потужність і температура. Регулювання витрат кисню та пропан-бутану в пальній суміші палика візуально за видом полум'я призводить до значних похибок [2].

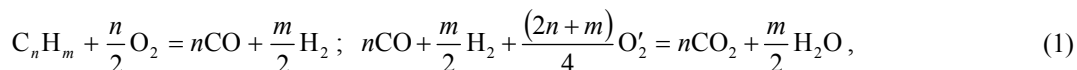
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контроль стехіометричного співвідношення кисню та горючого газу в пальній суміші палика шляхом визначення хімічного складу продуктів згорання газоаналізаторами і хроматографами вимагають багато часу проведення аналізу, складного обладнання та висококваліфікованого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

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

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Невирішено 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 палика по потоку випромінювання полум'я при спалюванні пропан-бутану є актуальним завданням.

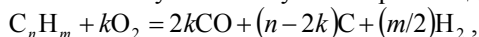
Мета досліджень. Спростити засіб контролю витрат кисню, які відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану в пальній суміші палика.

Викладення основного матеріалу. Як газ-замінник 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 у дві стадії за схемою:



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

При недостатці кисню у пальній суміші перша стадія реакції горіння проходить за схемою:



де k – кількість молекул кисню використаних у 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) Φ_e в інтервалі довжин хвиль $d\lambda$ і енергетичну світимість АЧТ M_e з площею видимої частини A_1 визначають за формулами:

$$\hat{O}_a = \int_0^{\infty} \hat{O}_a(\lambda) d\lambda; \quad M_e = d\hat{O}_a dA_1, \quad (2)$$

де \hat{O}_a – потік випромінювання АЧТ; λ – 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:

$$M_{e\text{ст}} = \varepsilon_r M_e, \quad (3)$$

де $M_{e\text{ст}}$ – енергетична світимість сірого тіла (полум'я); ε_r – ступінь чорноти полум'я палика.

Ступінь чорноти полум'я палика ε_r визначено за виразом:

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

де $\tau = \tau_{\text{a}} + \tau_{\text{a}}$ – оптична товщина полум'я, яка складається з оптичних товщин газів τ_{a} та дисперсної фази полум'я τ_{a} [7].

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

$$\tau = \tau_{\text{a}} = k_{\lambda} s, \quad (5)$$

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

Спектральний показник поглинання полум'я визначено за формулою:

$$k_{\lambda} = (\mu/\gamma) \cdot k(r_0), \quad (6)$$

де μ – концентрація частинок сажового вуглецю; γ – густина частинок; $k(r_0)$ – функція, яка визначається оптичними розмірами частинок [8].

З формул (3)–(6) слідує, 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 в пальній суміші, виконано із застосуванням установки, показаній на рисунку 1.

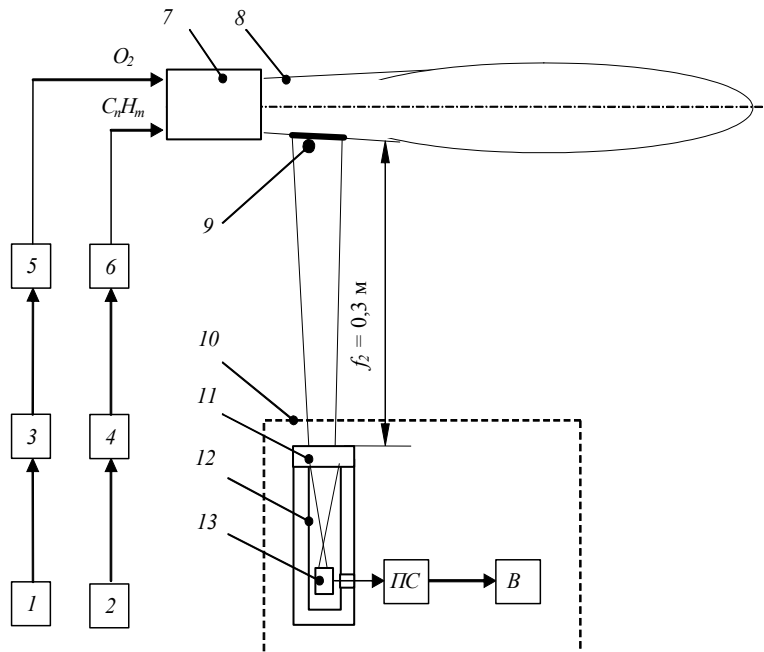


Рис. 1. Схема установки вимірювання потоку випромінювання сажового вуглецю полум'я: 1, 2 – балони кисневий та пропановий; 3, 4 – редуктори кисневий та пропановий; 5, 6 – ротаметри кисневий та пропановий; 7 – пальник; 8 – полум'я; 9 – майданчик візування; 10 – ОЕП; 11 – об'єктив ОЕП; 12 – датчик ОЕП; 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 $f_2 = 0,3$ м від осі струменя 8 пальника. Об'єктив 11 ОЕП 10 вирізує майданчик візування 9. Вимірювання потоку випромінювання полум'я виконано кремнієвим фотодіодом 13, встановленим у корпусі 12 ОЕП 10. Сигнал із фотодіода 13 поданий 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 за довжиною електромагнітних хвиль зі смугами випромінювання газів, які належать до складу газоподібних продуктів полум'я [8].

При стехіометричному співвідношенні кисню та пропан-бутану у пальній суміші газу згорають без залишку, за межами ядра полум'я вуглецю немає (1). В цьому випадку $\mu = 0$, $k_{\lambda} = 0$, $\tau = \tau_{\text{a}} = 0$,

$\tau_{\text{п}} = 0$ $M_{\text{ендо}} = \varepsilon_i M_e = 0$ (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:

$$U = \tau_c \tau_i \dot{I}_{\text{ендо}} (D_{\text{вх}} / 2f_1)^2 SR_{\text{ф}}; M_e = \Phi_e / Q, \quad (7)$$

де U – напруга на виході ОЕП; τ_c – коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем; τ_i – 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_{33} – опір резистора зворотного зв'язку операційного підсилювача сигналу; \dot{O}_a – 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 $V_{\text{п}}$ змінювали витрати кисню V_k з кроком h та виконували вимірювання напруги на виході ОЕП. Початковий напрям руху робочої точки за характеристикою об'єкта обрано в бік 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 -го досліджу з врахуванням поправки; U_i – значення напруги на виході ОЕП i -го 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 результатами 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 (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 $V_{\text{кк}}$, яке відповідає стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану в пальній суміші, визначено за спадом до нуля потоку випромінювання частинок сажового вуглецю і дорівнює 19 л/хв.

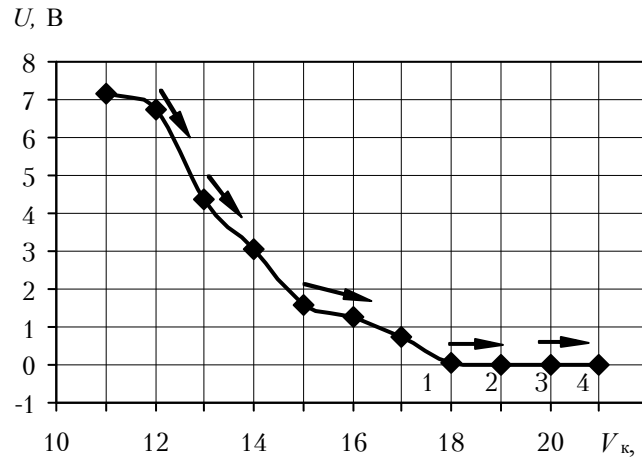


Рис. 2. Залежність напруги на виході ОЕП від витрат кисню (витрати пропан-бутану 10,0 л/хв.)

При виконанні контролю витрат кисню обрано нижню $U_n = 0$ В та верхню $U_b = 0,02$ В межі допускового інтервалу для значень параметра, що вимірюють. При значенні напруги на виході ОЕП, яке знаходиться в допусковому інтервалі $U_n \leq U_i \leq U_b$, витрати кисню збільшувати припиняють. При цьому: витрати кисню $V_{кc} = 19$ л/хв. і відповідають стехіометричному співвідношенню кисню та пропан-бутану в пальній суміші газового пальника; отримано нормальне (нейтральне) полум'я; результат вимірального 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 об'єкта
1	11	7,156	$0 < 7,156 > 0,02$	непридатний
2	12	6,756	$0 < 6,756 > 0,02$	непридатний
3	13	4,356	$0 < 4,356 > 0,02$	непридатний
4	14	3,056	$0 < 3,056 > 0,02$	непридатний
5	15	1,556	$0 < 1,556 > 0,02$	непридатний
6	16	1,256	$0 < 1,256 > 0,02$	непридатний
7	17	0,756	$0 < 0,756 > 0,02$	непридатний
8	18	0,056	$0 < 0,056 > 0,02$	непридатний
9	19	0	$0 = 0 < 0,02$	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 в пальній суміші пальника, забезпечує повне згорання пропан-бутану та кисню без залишку, оскільки 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.

Список використаної літератури:

1. Справочник сварщика / Ю.А. Денисов, Г.Н. Кочева, Ю.А. Маслов и др. ; под ред. В.В. Степанова. – 4-ое изд., перераб и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 560 с.
2. Соколов И.И. Газовая сварка и резка металлов : учебник / И.И. Соколов. – 2-ое изд., испр. и доп. – М. : Высш. школа, 1981. – 320 с.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы : учебник / 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. Якушенков. – 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 Міжнар. наук.-практ. конф. «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.

НОЧВАЙ Володимир Матвійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– газотермічні покриття;

– прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Тел.: (096)211–79–41; (0412) 22–13–65.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2012