

УДК 621.7.08:531.733

В.М. Ночвай, асист.
Житомирський державний технологічний університет
В.Г. Петрук, д.т.н., проф.
Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК

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 значною мірою 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 у формі відповідно до стандарту МІ 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 [3] встановлено зв'язок між напругою на виході пірометра та світністю 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 із 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. У полум'я з робочої зони надходить повітря, в складі якого є металева пилюка та сажа (рис. 1).

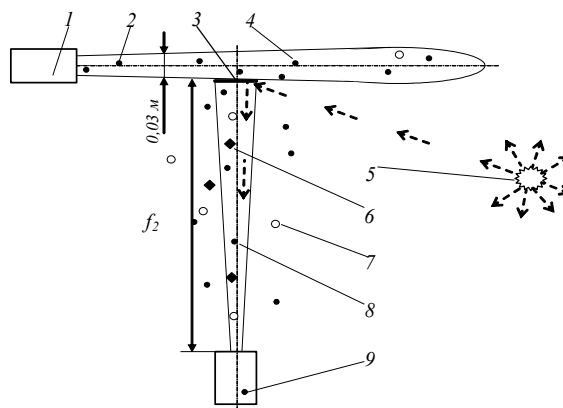


Рис. 1. Схема вимірювання потоку випромінювання твердих частинок:

- 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. У повітрі робочої зони знаходяться частинки металевого

порошку, сажі та води. При вимірюванні потоку випромінювання частинок (діапазон $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$ м) присутнє стороннє джерело випромінювання – світильник штучного освітлення.

Таким чином, на параметри потоку випромінювання твердих частинок впливають такі фактори: поглинання випромінювання середовищем τ_c , яке знаходиться між твердими частинками та пірометром; випромінювання твердих домішок, що надходять у полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони Φ_r ; відбите твердими частинками випромінювання сторонньо-го джерела Φ_c . Відповідно систематичні похибки можуть бути таких типів: δ_r , δ_t та δ_c .

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

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

де $U_{\text{вих}}$ – напруга на виході пірометра; k_1 – коефіцієнт, який визначається параметрами пірометра; τ_c – коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем; M_e – світність частинок; ϵ_r – коефіцієнт випромінювання частинок; $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ – постійна Стефана-Больцмана; T – температура частинок, К [3]. Тоді, виходячи з функції (1), формула для відносної похибки результату вимірювання має вигляд:

$$\Delta_U = \Delta_{\Phi} + \Delta_r + \Delta_c,$$

де Δ_U – сумарна похибка вимірювання потоку випромінювання частинок сажі; Δ_r – похибка, яка породжена поглинанням випромінювання середовищем τ_c ; Δ_t – похибка, яка породжена випромінюванням твердих домішок, що надходять у полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони; Δ_c – похибка, яка породжена випромінюванням стороннього джерела [4].

Похибку Δ_t визначено за виразом:

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

де v_λ – спектральний коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем; v_o – коефіцієнт пропускання випромінювання у вакуумі. Спектральний коефіцієнт пропускання випромінювання середовищем визначено на основі закону Бугера-Бера за формулою:

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

де k_λ – 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:

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

де D – діаметр частинок води, пилюки; λ – довжина хвилі випромінювання [5, 6, 8]. Оскільки $\rho = 62,8 \gg 1$, то відповідно до теорії Мі частинки води та пилюки є частинками великих розмірів [8], і k_λ такого середовища визначено за формулою:

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

де μ , γ – 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 $r_o = 10 \cdot 10^{-6}$ м значення $r_o/r_\lambda = 1,1$ (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 вигляд:

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

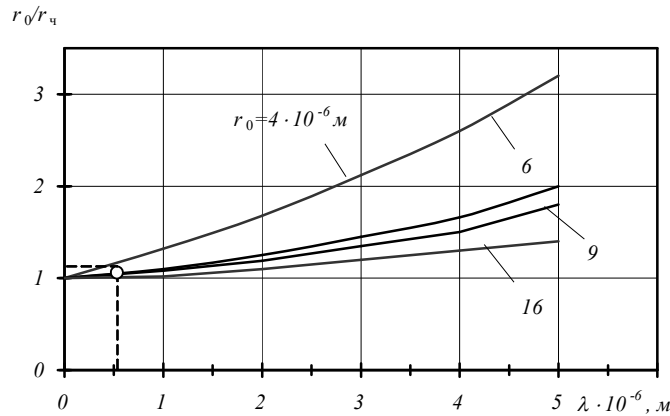


Рис. 2. Залежність r_o/r_u від довжини хвилі й розмірів частинок [5]

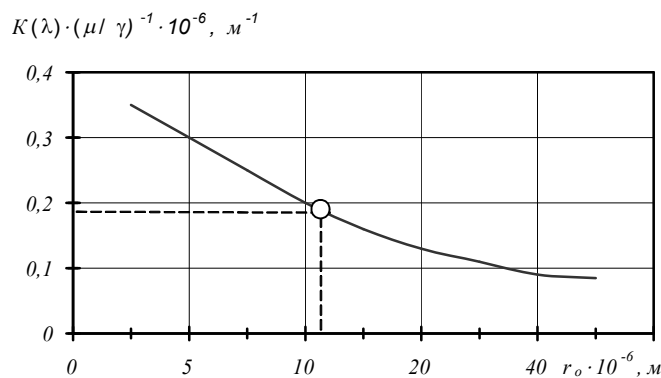


Рис. 3. Залежність k_λ від оптичних розмірів частинок [5]

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

Таблиця 1

Значення параметрів поглинаючих частинок, що знаходяться в шарі повітря

Поглинаючі частинки	γ , кг/м^3	μ , кг/м^3	k_\square , м^{-1}
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 за формулами (3) та (2) отримано: $v_\tau = 0,997$, а похибка $\delta_\tau = -0,3 \%$.

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

$$d_\tau = \frac{e_\tau - e_o}{e} \cdot 100 \%,$$

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

$$e_\tau = 1 - \exp(-\Phi),$$

де $\tau = \tau_\tau + \tau_a$ – оптична товщина полум'я, яка складається з оптичних товщин газів τ_τ та твердої дисперсної фази (твердих домішок) полум'я τ_a [8], а оскільки в інтервалі довжин хвиль $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,1 \cdot 10^{-6}$ м газу прозорі [2], то $\tau_\tau = 0$, а оптичну товщину полум'я, в якому є тверді домішки, визначено за виразом [8]:

$$\Phi = \Phi_a = k_\lambda L.$$

Оскільки для прийнятих значень $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м та $r_u = 10 \cdot 10^{-6}$ м параметр дифракції $\rho\rho = 62,8$ (4), то спектральні показники поглинання частинками пилюки, металевої пилюки та сажі визначено за

формулою (6). Значенням концентрації твердих домішок у повітрі, що надходить в полум'я, прийнято значення гранично допустимої концентрації в повітрі робочої зони для сажі $4 \cdot 10^{-6}$ кг/м³ [9], а для металевієї пилюки прийнято $2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³. У стиснутих газах вміст смоли та пилюки може бути до $1 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ та в перерахунку на HCN до $0,05 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ ціанієвих сполук [10].

Поглиналим шаром є високотемпературний струмінь газ-тверді частинки товщиною 0,03м. Оптичні товщини полум'я τ_p , τ_m та τ_c визначено відповідно за виразами:

$$\Phi_p = k_{лп} L; \Phi_m = k_{лм} L; \Phi_c = k_{лс} L,$$

де τ_p , τ_m , τ_c – оптичні товщини полум'я відповідно з частинками пилюки, металевієї пилюки та сажі; $k_{лп}$, $k_{лм}$, $k_{лс}$ – спектральні показники поглинання випромінювання відповідно частинками пилюки, металевієї пилюки та сажі (табл. 2).

Таблиця 2

Значення параметрів поглинаючих частинок та оптичних товщин полум'я

Поглинаючі частинки	γ , кг/м ³	μ , кг/м ³	k_{\square} , м ⁻¹	τ
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, металевієї пилюки та сажі, визначено за виразом $\tau = \tau_p + \tau_m + \tau_c$ і дорівнює $6,9 \cdot 10^{-4}$. Тоді ступінь чорноти полум'я $\epsilon_r = 6,9 \cdot 10^{-4}$ і для граничного значення температури твердих домішок $T = 3173$ К значення похибки $\delta_r = 0,0813$ %.

Похибку δ_c , яка породжена випромінюванням стороннього джерела, визначено за формулою:

$$\delta_c = \frac{e_{\text{екв}} - e}{e} \cdot 100 \%,$$

де $e_{\text{екв}}$, e – 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:

$$L_c = L_{\text{об}} + L_{\text{від}} = eL_{\text{об}}^0 + (1-e)z_1z_2L_{\text{ст}} = L_{\text{об}}^0 [e + (1-e)z_1z_2(L_{\text{ст}} / L_{\text{об}}^0)],$$

де L_c – сумарна енергетична яскравість об'єкта випромінювання; $L_{\text{об}}$ – власна енергетична яскравість об'єкта випромінювання; $L_{\text{від}}$ – енергетична яскравість об'єкта випромінювання від стороннього джерела випромінювання; $L_{\text{об}}^0$ – яскравість абсолютно чорного тіла (АЧТ); η_1 – коефіцієнт, який характеризує взаємне розміщення об'єкта та джерела оптичної перешкоди; η_2 – коефіцієнт, який характеризує вид обробки поверхні об'єкта; $L_{\text{ст}}$ – енергетична яскравість стороннього джерела [5]. Звідси визначено:

$$e_{\text{екв}} = e + (1-e)z_1z_2(L_{\text{ст}} / L_{\text{об}}^0). \tag{7}$$

Коефіцієнти η_1 та η_2 визначено відповідно за формулами:

$$z_1 = \cos \alpha_{\text{ст}} \cdot \Omega / p; \quad z_2 = 1 / p,$$

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

$$\Omega = A_{\text{сф}} / r_{\text{сф}}^2,$$

де $A_{\text{сф}}$ – площа сферичної поверхні, яка знаходиться всередині конуса тілесного кута з вершиною в центрі сфери; $r_{\text{сф}}$ – радіус сфери [11]. Прийнято: $A_{\text{сф}} = Q = 1,96 \cdot 10^{-5}$ м²; $\alpha_{\text{ст}} = 50^\circ$, $r_{\text{сф}} = f_2 = 0,3$ 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:

$$L_{\text{ст}} = E_e / \Omega, \tag{8}$$

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:

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

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

$$E_v = 683 \cdot \int_0^{\infty} S_{\lambda} E_{en} d\lambda, \tag{10}$$

де E_v – освітленість майданчика візування.

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

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

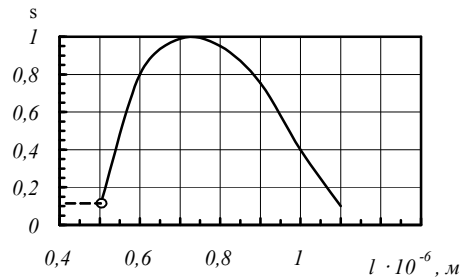


Рис. 4. Спектральна характеристика кремнієвого фотодіода [12]

Значення енергетичної яскравості та світності АЧТ визначено за формулами:

$$L_{en} = M_{en} / p; M_{en} = C_1 \cdot l^{-5} [\exp(C_2 / lT) - 1]^{-1},$$

де L_{en} – енергетична яскравість АЧТ; M_{en} – енергетична світність АЧТ; C_1, C_2 – постійні Планка [11]. Після підстановки значення $\varepsilon = 0,85, \eta_1, \eta_2, L_{ct}$ та $L_{об} = L_{en}$ у 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 $\delta_c = 2,59 \cdot 10^{-11} \%$. Оскільки похибка δ_c у 3137581844 разів менша похибки δ_{τ} , то похибкою δ_c можна знехтувати і опустити з подальшого розгляду. Похибки δ_{τ} та δ_{τ} незалежні, закон розподілу похибок – рівномірний. Тоді похибки δ_{τ} та δ_{τ} прийнято половинами ширини рівномірного розподілу і визначено с.к.в. як

$$y_{\phi} = d_{\phi} / \sqrt{3}; y_{\tau} = d_{\tau} / \sqrt{3},$$

де $\sigma_{\tau}, \sigma_{\tau}$ – с.к.в. похибок δ_{τ} та δ_{τ} [4], і в результаті розрахунків отримано: $\sigma_{\tau} = 0,1732 \%$; $\sigma_{\tau} = 0,0469 \%$. Тоді суму σ_{τ} та σ_{τ} визначено за формулою:

$$y = \sqrt{y_{\tau}^2 + y_{\tau}^2},$$

де σ – с.к.в. сумарної похибки [4] і дорівнює 0,1794 %.

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

$$p = y_{\tau}^2 / y^2; \varepsilon_p = \varepsilon_1 p^2 + 6p(1-p) + \varepsilon_2(1-p)^2; \chi = 1 / \sqrt{\varepsilon_p}; k = \sqrt{3 \cdot e^C / (1 + C^2)},$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_p$ – ексцес першої, другої складових та сумарної похибки, $C = \sigma_{\tau} / \sigma_c$ [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:

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

де δ_d – довірче значення похибки; t – множник, який залежить від значення довірчої ймовірності P ; δ – 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 $\delta_{\tau}, \delta_{\tau}$ та δ_c і суттєво залежить від поглинання випромінювання середовищем та випромінювання твердих домішок, що надходять у полум'я з балонними газами та з повітрям робочої зони. Оскільки відомо значення та знак сумарної систематичної похибки, то вона може бути видалена шляхом введення поправки.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Необхідно дослідити сумарні похибки вимірювання потоку випромінювання частинок сажового вуглецю при контролі витрат кисню пального і обчислити оцінку достовірності результатів вимірювального контролю витрат кисню.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Пат. UA 76332 У Україна, МКІ Р23N 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.
2. Ночвай В.М. Дослідження випромінювання двофазного потоку газ–тверді частинки // 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 світністю твердих частинок двофазного потоку газ–тверді частинки // 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., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат., 1991. – 304 с.
5. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
6. Петрук В.Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю): Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 207 с.
7. Духанин Ю.А., Акулин Д.Ф. Техника безопасности и противопожарная техника в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1973. – 304 с.
8. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
9. Белов С.В., Бринза В.Н., Векишин Б.С. Безопасность производственных процессов: Справочник / Под общ. ред. С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.
10. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справ. руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
11. Якушенко Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения. – 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.

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

Наукові інтереси:

- газотермічні покриття;
 - прилади і методи контролю та визначення складу речовин.
- Тел.: 8-096-2117941.

ПЕТРУК Василь Григорович – доктор технічних наук, професор, декан факультету екології та екологічної кібернетики, завідувач кафедри екології та екологічної безпеки Вінницького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- хімічна технологія електровакуумних матеріалів та приладів;
 - спектрофотометрія неоднорідних середовищ.
- Тел. (р): (0432) 59-82-50.

Подано 29.10.2008

Ночвай В.М., Петрук В.Г. Дослідження систематичних похибок вимірювання потоку випромінювання твердих частинок

Ночвай В.М., Петрук В.Г. Исследование систематических погрешностей измерения потока излучения твердых частиц

Nochvaj V.M., Petruk V.G. Study of systematic inaccuracy of flow measurement of radiating the hard particles

УДК 621.7.08:531.733

Исследование систематических погрешностей измерения потока излучения твердых частиц / В.М. Ночвай, В.Г. Петрук

В работе выполнен анализ и расчет систематических погрешностей измерения потока излучения твердых частиц, которые находятся в струе газовой горелки.

УДК 621.7.08:531.733

Study of systematic inaccuracy of flow measurement of radiating the hard particles / V.M. Nochvaj, V.G. Petruk

In work executed analysis and calculation of systematic inaccuracy of flow measurement of radiating the hard particles, which base gas burner in stream of.