

## Математичне моделювання та дослідження процесу самозаймання пиловугільних сумішей з урахуванням радіаційного теплообміну

Борис Кузьменко<sup>1</sup>, Ігор Мальчевський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> д. т. н., професор, Національний аграрний університет, Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ

<sup>2</sup> к. т. н., с. н. с., Президія Національної академії наук України, вул. Володимирська, 54, Київ-30, 252601, e-mail: sftm@nas.gov.ua

*Запропоновано математичну модель процесу самозаймання пиловугільних сумішей з урахуванням радіаційного теплообміну.*

В основу математичної моделі процесу самозаймання пиловугільних сумішей з урахуванням радіаційного теплообміну покладено: рівняння теплового балансу суміші, що реагує; рівняння матеріального балансу за витратою кисню; рівняння матеріального балансу за витратою вугільного пилу [1-3]. Для умов, коли враховується радіаційний теплообмін, порівняно з випадком, коли останній не враховується, змінюється тільки перший складник математичної моделі процесу самозаймання — рівняння теплового балансу суміші, що реагує, два інших рівняння залишаються такими ж, як і для випадку, коли радіаційний теплообмін не враховується. Тоді рівняння теплового балансу суміші, що реагує, матиме вигляд

$$dQ_p - dQ_n - dQ_m - dQ_{pm} = 0, \quad (1)$$

де  $dQ_p$  — теплота, що виділяється в процесі хімічного реагування в суміші в елементарному об'ємі;  $dQ_n$  — теплота, яка витрачається на нагрівання суміші;  $dQ_m$  — теплота, що відводиться в навколишнє середовище;  $dQ_{pm}$  — теплота, що виділяється в процесі теплового випромінювання.

Для складників  $dQ_p$ ,  $dQ_n$ ,  $dQ_m$  використовують відомі співвідношення [1, 4], а саме,

$$\begin{aligned} dQ_p &= \beta k_0 e^{-E/RT} C \mu \frac{273^2}{T^2} f Q \frac{\pi D^2}{4} dx = \beta k_0 C_0 f Q \frac{R^2}{E^2} 273^2 \frac{\pi D^2}{4} C \mu \frac{1}{\theta^2} e^{-1/\theta} d\chi, \\ dQ_n &= V_{\text{сум}} c_{\text{сум}} \frac{dT}{dx} dx = \frac{E}{R} W_0 (c_g + \mu_0 c_n) \frac{\pi D^2}{4} \frac{d\theta}{dx} d\chi, \\ dQ_m &= \alpha (T - T_1) \pi D dx = \alpha \frac{E}{R} (\theta - \theta_1) \pi D d\chi. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут  $\beta$  — стехіометричний коефіцієнт;  $k_0$  ( $\text{с}^{-1}$ ) — передекспоненціальний множник;  $E$  (кДж/моль) — енергія активації;  $R = 8,314$  (кДж/(моль·К)) — універсальна газова стала;  $T$  (К) — температура суміші;  $C$ ,  $\mu$  (кг/м<sup>3</sup>) — концентрації кисню та

пилу за температури 20°C та тиску 0,1013 МПа, а  $C_0, \mu_0$  — їх початкові значення;  $f, Q$  (м<sup>2</sup>/кг, кДж/кг) — питомі площа поверхні та теплотворна здатність вугільного пилу;  $D$  (м) — діаметр камери;  $dx$  (м) — елементарна ділянка камери;  $\theta = RT/E$  — безрозмірна температура;  $V_{\text{сум}} = W_0 \pi D^2 / 4$  (м<sup>3</sup>/кг с) — потужність витрати суміші;  $c_{\text{сум}} = (c_g + \mu_0 c_0)$  (кДж/(м<sup>3</sup>·К)) — теплоємність суміші;  $W_0$  (м/с) — швидкість;  $c_g$  (кДж/(м<sup>3</sup>·К)),  $c_n$  (кДж/(кг·К)) — теплоємності повітря та вугільного пилу;  $\alpha$  (кВт/(м<sup>2</sup>·К)) — коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки;  $T_1$  (К) — початкове значення температури суміші, яка дорівнює температурі стінок камери;  $\theta_1 = RT_1 / E$ .

Для  $dQ_{pm}$  маємо [1]

$$\begin{aligned} dQ_{pm} &= \pi \varphi_{12} \varepsilon_{np} c'_0 \Delta (\theta^4 - \theta_1^4) \frac{E^4}{R^4} 10^{-8} dx = \\ &= \frac{4 \varphi_{12} \xi \varepsilon_{np} \Delta c'_0 \left(\frac{E}{R}\right)^6 10^{-8}}{\beta k_0 \mu_0 c_0 f Q D^2 273^2} (\theta^4 - \theta_1^4) d\chi, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\chi = x \frac{\beta k_0 c_0 \mu_0 f Q R^3 273^2}{W_0 (c_0 + \mu_0 c_n) E^3}$  — безрозмірна геометрична координата.

З урахуванням співвідношень (2), (3) для  $dQ_p, dQ_n, dQ_m, dQ_{pm}$  після нескладних перетворень з формули (1) отримуємо [1]

$$\frac{d\theta}{d\chi} = -\frac{1}{\theta^2} e^{-\frac{1}{\theta}} - \Omega (\theta - \theta_1) - \zeta A (\theta^4 - \theta_1^4), \quad (4)$$

де  $A = \frac{\Delta c'_0 (E/R)^6}{k_0 \mu_0 c_0 f Q D^2 273^2} 10^{-8}$ ,  $\zeta = \frac{4 \varphi_{12} \varepsilon_{np} \xi}{\beta}$ .

Математична модель процесу самозаймання включає також ще два співвідношення, які відображають баланс витрат кисню та вугільного пилу,

$$\frac{d\bar{c}}{d\chi} = -\frac{1}{\theta_{ao}} - \frac{1}{\theta^2} e^{-\frac{1}{\theta}}, \quad (5)$$

$$\bar{\mu} = 1 - \alpha (1 - \bar{c}), \quad (6)$$

де  $\theta_{ao}$  — безрозмірна адиабатна температура пиловугільної суміші за початкової температури 0°C.

Співвідношення (4)-(6) складають математичну модель процесу самозаймання пиловугільних сумішей із урахуванням радіаційного теплообміну.

Якщо теплове випромінювання не враховується або відсутнє, то рівняння теплового балансу суміші має вигляд

$$dQ_p - dQ_n - dQ_m = 0. \quad (7)$$

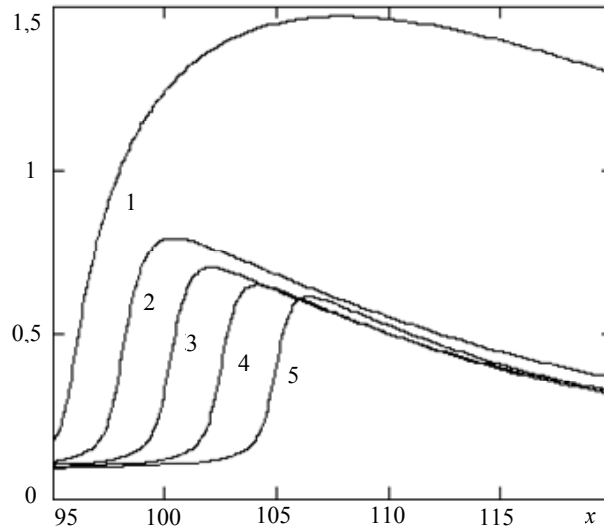


Рис. Залежність температури паливно-повітряної суміші від безрозмірної координати:  $\alpha = 0,1$ ;  $\theta = 2,3$ ;  $\Omega = 0,03$ ;  $y_{29} = 0,07$ ;  $\sigma = 0; 0,5; 1; 1,5; 2$  (криві 1-5 відповідно)

У цьому випадку рівняння (4) набуває вигляду

$$\frac{d\theta}{d\chi} = -\frac{1}{c\mu} \frac{1}{\theta^2} e^{-\frac{1}{\theta}} - \Omega(\theta - \theta_1). \quad (8)$$

Із метою аналізу отриманого узагальнення математичної моделі теплового самозаймання нами виконані розрахунки (див. рис.) із використанням пакету MathCAD 11 [5] для  $\alpha = 0,1$ ;  $\theta_{a0} = 2,3$ ;  $\Omega = 0,03$ ;  $y_{29} = 0,07$ ; параметр  $\sigma = \zeta A$  варіювався в межах  $0 \div 2$ . Координати точок максимумів кривих 1-5 (див. рис.) наведено також у таблиці.

Таблиця

№	$\sigma$	$\chi_{\max}$	$\theta_{\max}$
1	0,0	107,8	1,47
2	0,5	100,3	0,80
3	1,0	102,0	0,70
4	1,5	104,1	0,65
5	2,0	106,4	0,62

Отримані результати свідчать про наявність суттєвого впливу теплового випромінювання на процес теплового самозаймання. Ступінь цього впливу визначається теплофізичними, конструктивними й іншими загальними параметрами (величиною  $A$ ), а також специфічними параметрами, які характеризують процес теплового випромінювання, — величиною  $\zeta$ .

**Висновки.** Отримані результати свідчать про наявність суттєвого, вирішального впливу теплового випромінювання на процес теплового самозаймання, на місце знаходження точки самозаймання, тобто на її геометричне розташування (безрозмірна координата  $\chi_{\max}$ ) і на величину температури самозаймання (безрозмірна координата  $\theta_{\max}$ ). Зростання величини  $\sigma = \zeta A$  збільшує частку енергії, пов'язану з радіаційним теплообміном, зменшує величину температури самозаймання, приводить до зміщення точки самозаймання праворуч, у сторону збільшення її геометричної координати.

### **Література**

- [1] Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. — М.-Л.: Энергия, 1962. — 331 с.
- [2] Хзмалян Д. М. Теория топочных процессов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
- [3] Кузьменко Б. В., Болбот І. М., Майстренко О. Ю. Математичне моделювання нестационарного самозаймання паливно-повітряних сумішей // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. — 2005. — № 2(11). — С. 96-99.
- [4] Математичне моделювання процесу самозаймання пиловугільних сумішей з урахуванням радіаційного теплообміну / Кузьменко Б. В., Мальчевський І. А., Буляндра О. Ф. та ін. // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. — 2006. — № 3(18). — С. 8-10.
- [5] Бидасюк Ю. М. Mathsoft MathCAD Н. Самоучитель. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. — 224 с.

## **Mathematical modeling and investigation of the process of coal dust mixtures spontaneous self-lighting with account of radiation heat transfer**

Borys Kuzmenko, Ihor Malchevskiy

*The mathematical model of the process of spontaneous self-lighting of coal dust mixtures with account of radiation heat transfer is obtained.*

## **Математическое моделирование и исследование процесса самовозгорания пылеугольных смесей с учетом радиационного теплообмена**

Борис Кузьменко, Игорь Мальчевский

*Предложена математическая модель процесса самовоспламенения пылеугольных смесей с учетом радиационного теплообмена.*

Отримано 21.02.08