
ТЕПЛООБМІН, ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, ГАЗОПОСТАЧАННЯ

УДК 697. 432. 5

Моделювання процесу горіння твердого палива в шахтно-шарових топках

М.П.Сенчук¹, М.М.Астаф'єва.²

¹канд. техн. наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, smp_21@ukr.net.

²канд. фіз-мат. наук, доцент, Київський університет імені Бориса Грінченка, m.astafieva@kubg.edu.ua

Розроблена математична модель процесу горіння твердого палива в шахтно-шарових топках з поступальним і обертальним його переміщенням на колосниковій решітці. Наведено аналітичні рівняння для розрахунку основних параметрів зони горіння.

Ключові слова: шахтно-шарова схема спалювання, колосникова решітка з поступальним (обертальним) переміщенням палива, швидкість горіння, математична модель, диференціальне рівняння.

Вступ. Збільшення частки твердого палива у виробництві теплової енергії із забезпеченням ефективності процесу горіння відповідно до нормативних вимог є актуальною задачею [1]. В твердопаливних котлах малої комунальної енергетики здебільшого паливо спалюється в шарових топках, зокрема, в механічних топках з поперечною схемою переміщення палива і повітря. Для спалювання різних видів твердого палива найбільш ефективною схемою організації процесу горіння є шахтно-шарова, яка реалізована в механічних топкових пристроях з плунжерним штовхачем [2, 3]. У такій топці здійснюється комбінований процес спалювання палива: поєднання шахтного спалювання та процесу горіння в шарі на колосниковій решітці. У вертикальній шахті із затискною решіткою відбувається сушіння та газифікація натурального палива, виділення летких речовин з накопиченням в нижній частині шахти однорідного палива з переважаючою часткою коксу, яке інтенсивно підпалюється за протитечійною схемою. Процес горіння коксового залишку палива відбувається на колосниковій решітці за поперечною схемою: дугттьове повітря в необхідній кількості подається під решітку, а паливо, що горить, під дією штовхача переміщується по колосниковій решітці з заданою швидкістю, при якій забезпечується повне його вигорання на прийнятій довжині решітки. Необхідна довжина решітки залежить від якості палива та режимних і конструктивних параметрів зони горіння. Конструкція колосникової решітки з поступальним переміщенням палива, що

горить, застосовується, переважно, в механічних топках механізованих котлів потужністю понад 300 кВт. Для малогабаритних котлів невеликої потужності доцільно застосовувати топки з обертальним переміщенням палива на решітці [3].

Розробка конструкції топкових пристроїв базується на даних нормативної та довідкової літератури [4] та результатах експериментальних досліджень натурних зразків. Одним із напрямків уточнення методики розрахунку топкових пристроїв є аналітичні розрахунки за моделями процесу спалювання твердого палива. Для механічних топкок з шахтно-шаровою схемою спалювання нижче наведено розроблену на основі диференціальних рівнянь математичну модель процесу горіння палива в шарі на колосниковій решітці із поступальним та обертальним його переміщенням.

А. Для прямолінійного поступального переміщення палива на решітці.

При побудові математичної моделі припустимо, що:

1) горіння частинок в шарі протікає при високих температурах за схемою подвійного шару, що горить [2]. Кисень дуттьового повітря витрачається у поверхневому шарі частинки на горіння CO і H_2 ;

2) процес спалювання палива найбільш повно характеризується швидкістю горіння (питомою швидкістю горіння), що визначає швидкість газоутворення і дорівнює відношенню кількості спалюваного (перетвореного в газоподібний стан) палива в одиницю часу до сумарної поверхні реагування [5];

3) частинки коксового залишку, що подаються на решітку, мають форму кулі й цю форму зберігають до кінця згорання;

4) переміщення палива на решітці відбувається так, наче кожен поперечний шар складається з частинок палива одного діаметра й має товщину, що дорівнює цьому діаметру; частинки в процесі згорання осідають, і їх укладка змінюється в межах лише «свого» шару.

Нехай $\delta(x)$ – діаметр частинки в точці x ; $h(x)$ – висота шару коксу в точці x ; $v(x)$ – лінійна швидкість частинки в точці x ; b – ширина решітки, на якій відбувається спалювання.

Виділимо шар палива, який по осі Ox (поздовжньому розрізу решітки) займає положення від x до $x + \Delta x$ у деякий момент часу τ . Через проміжок часу $\Delta \tau$ цей шар займе нове положення між точками A та B (рис. 1). Координати точок A та B на осі Ox будуть, відповідно,

$$x + v(x)\Delta \tau \text{ та } (x + \Delta x) + v(x + \Delta x)\Delta \tau = x + \Delta x + v(x)\Delta \tau + v'(x)\Delta x\Delta \tau + o(\Delta x).$$

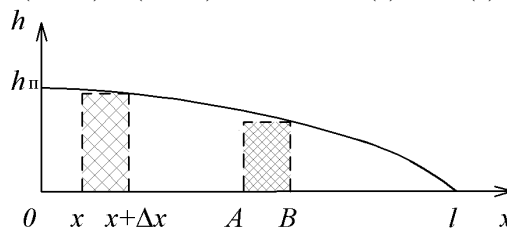


Рис. 1. Вигорання палива з поступальним переміщенням на решітці

Об'єм виділеного шару палива в моменти часу τ і $\tau + \Delta\tau$ з точністю до малих вищих порядків дорівнює, відповідно:

$$\Delta V_{\tau} = h(x) \cdot b \cdot \Delta x,$$

$$\Delta V_{\tau+\Delta\tau} = h(x + v\Delta\tau) \cdot b \cdot (\Delta x + v'\Delta x\Delta\tau + o(\Delta x)) = \Delta V_{\tau} + b(hv)'\Delta x\Delta\tau.$$

Тоді кількість (n) частинок у виділеному шарі, порахована в моменти часу τ і $\tau + \Delta\tau$, становить:

$$n = \frac{6mhb}{\pi\delta^3} \Delta x, \quad (1)$$

та

$$n = \frac{m\Delta V_{\tau+\Delta\tau}}{\frac{\pi}{6}\delta^3(x + v\Delta\tau)} = \frac{6mb}{\pi\delta^3} \Delta x \left[h + \left((hv)' - 3\frac{hv\delta'}{\delta} \right) \Delta\tau \right], \quad (2)$$

де m – порізність шару.

За припущенням 4), прийнятим для математичної моделі, кількість частинок у виділеному шарі не змінюється з часом. Тому, прирівнюючи (1) та (2) і переходячи в одержаній рівності до границі при $\Delta x, \Delta\tau \rightarrow 0$, після нескладних перетворень приходимо до диференціального рівняння

$$(hv)' = 3hv\frac{\delta'}{\delta},$$

інтегруючи яке, маємо:

$$h = c_1 \cdot \frac{\delta^3}{v}, \quad c_1 - \text{довільна стала.} \quad (3)$$

Із очевидних співвідношень $\delta(x) = v(x)\Delta\tau$ та $\delta(x + \delta(x)) = v(x + \delta(x))\Delta\tau$ зміни розміру частинки вздовж решітки після деяких перетворень приходимо до диференціального рівняння

$$\frac{\delta'(x)}{\delta(x)} = \frac{v'(x)}{v(x)},$$

звідки

$$\frac{\delta(x)}{v(x)} = \text{const} = \frac{\delta_n}{v_n}. \quad (4)$$

Тут v_n, δ_n – відповідно, початкова швидкість і діаметр частинки на вході на решітку.

Останнє співвідношення показує, зокрема, що відношення діаметра частинки до її лінійної швидкості є величиною сталою упродовж всього горіння.

З урахуванням (4) співвідношення (3) можна переписати так:

$$h(x) = \frac{h_n}{\delta_n^2} \cdot \delta^2(x), \quad (5)$$

де h_n – початкова висота шаруна вході. Тобто, висота шару пов'язана з діаметром частинок квадратичною залежністю.

Із співвідношення (4) випливає залежність лінійної швидкості частинки коксу від її діаметра:

$$v(x) = \frac{v_n}{\delta_n} \cdot \delta(x). \quad (6)$$

Початкову лінійну швидкість v_n легко виразити через технологічні параметри зони горіння з таких міркувань. За час $\Delta\tau$ на решітку надходить паливо масою $\Delta B = h_n b v_n \Delta\tau \rho_c$, де $\rho_c = m\rho$. З іншого боку, $\Delta B = B_p \Delta\tau$, де B_p – розрахункова витрата палива. Тому $\rho_c h_n b v_n = B_p$, звідки маємо:

$$v_n = \frac{B_p}{b h_n \rho_c} = \frac{B_p}{b h_n m \rho}. \quad (7)$$

Диференціальне рівняння для визначення діаметра $\delta(x)$ частинки отримуємо з наступних міркувань. Маса спаленого палива за час $\Delta\tau$ у виділеному шарі дорівнює:

а) за балансом –

$$\Delta B_o = \rho_c \Delta V_\tau - \rho_c \Delta V_{\tau+\Delta\tau} = -\rho_c b (hv)' \Delta x \Delta\tau;$$

б) за масообміном –

$$\Delta B_m = K_s \Delta S \Delta\tau = K_s \pi \delta^2 n \Delta\tau = K_s \pi \delta^2 \cdot \frac{6mhb}{\pi \delta^3} \Delta x \Delta\tau = K_s \cdot \frac{6mhb}{\delta} \Delta x \Delta\tau,$$

де K_s – питома швидкість горіння, тобто відношення кількості палива, що згоряє за одиницю часу до сумарної площі поверхні горіння частинок в шарі [5]; ΔS – сумарна площа зовнішньої поверхні частинок.

Оскільки за законом збереження маси $\Delta B_o = \Delta B_m$, то

$$\rho_c b (hv)' = K_s \cdot \frac{6mhb}{\delta},$$

звідки

$$(hv)' = -K_s \cdot \frac{6h}{\rho \delta}. \quad (8)$$

Скориставшись залежностями (5) та (6) змінних висоти шару й лінійної швидкості від діаметра частинок, виразимо у рівнянні (8) усі невідомі величини через діаметр $\delta(x)$. Після нескладних перетворень матимемо диференціальне рівняння

$$\delta(x) \delta'(x) = -\frac{2K_s \delta_n}{\rho v_n}. \quad (9)$$

Враховуючи, що [5]

$$K_s = \frac{0,185 C_0 D^{0,5} W^{0,5}}{\delta^{0,5}} \quad \text{при } 17 \leq \text{Re}_D = \text{Wd}_{\text{ср}}/D < 320$$

і позначивши

$$A_s = \frac{2 \cdot 0,185 C_0 D^{0,5} W^{0,5} \delta_n}{\rho v_n} = \text{const},$$

маємо:

$$\delta^{1,5}(x)\delta'(x) = -A_s. \quad (10)$$

Інтегруємо рівняння (10) і отримуємо

$$\frac{2}{5}\delta^{2,5}(x) = -A_s x + C,$$

де C – довільна стала, яку знаходимо з умови повного згоряння палива на кінці решітки, тобто $\delta(l_p) = 0$. Визначивши з цієї умови $C = A_s l_p$, маємо остаточно:

$$\delta(x) = \left[\frac{5}{2} A_s (l_p - x) \right]^{\frac{2}{5}}. \quad (11)$$

Із (11) знаходимо довжину колосникової решітки

$$l_p = \frac{\delta_n^{2,5}}{2,5 A_s}. \quad (12)$$

Час горіння розрахуємо з рівняння $\frac{dx}{dt} = v(x)$ чи те саме, що $dt = \frac{dx}{v(x)}$,

інтегруючи його в межах від 0 до l_p :

$$t = \frac{5}{3} \cdot \frac{\delta_n}{v_n} \left(\frac{5}{2} A_s \right)^{\frac{2}{5}} \cdot l_p^{\frac{3}{5}}. \quad (13)$$

У припущенні, що K_s постійна величина протягом усього процесу вигорання, тобто не залежить від δ і від x , інтегруючи рівняння (9) та враховуючи (7), маємо:

$$\delta^2(x) = -\frac{4\delta_n K_s}{\rho v_n} \int_0^x dx + \delta_n^2 = \delta_n^2 - \frac{4\delta_n h_n b m K_s}{B_p} \cdot x.$$

Використавши умову $\delta^2(l_p) = 0$ (вкінці решітки діаметр частинки дорівнює нулю), із останнього співвідношення знаходимо довжину колосникової решітки:

$$l_p = \frac{\delta_n B_p}{4 h_n b m K_s}. \quad (14)$$

Інтегруючи в межах від 0 до l_p співвідношення $dt = \frac{dx}{v(x)}$, і враховуючи при цьому (6), (7) та (14), отримуємо час повного згоряння палива на решітці, що відповідає [2]:

$$t = \frac{\rho \delta_n}{2 K_s}. \quad (15)$$

Б. Для обертового переміщення палива на решітці.

Зробимо ті самі припущення 1) – 4), що й у п. А.

Позначимо також $\delta(\varphi)$ – діаметр частинок, розміщених вздовж того радіуса решітки, що утворює з початковим його положенням кут φ ; $h(\varphi)$ – висота шару частинок на радіусі (далі – «в точці») φ ; $\omega(\varphi)$ – кутова швидкість частинки в точці φ ; R – радіус решітки, на якій відбувається спалювання (рис. 2).

Нехай у момент часу τ виділений шар палива у вигляді сектора AOB займає положення між променями φ та $\varphi + \Delta\varphi$. Через проміжок часу $\Delta\tau \neq 0$ цей сектор переміститься і займе положення A_1OB_1 . Об'єм секторального шару в момент часу τ (ΔV_τ) та в момент $\tau + \Delta\tau$ ($\Delta V_{\tau+\Delta\tau}$), відповідно, дорівнює:

$$\Delta V_\tau = \frac{R^2 h(\varphi) \Delta\varphi}{2}, \quad \Delta V_{\tau+\Delta\tau} = \Delta V_\tau + \frac{R^2}{2} (h\omega)' \Delta\varphi \Delta\tau + o(\Delta\varphi, \Delta\tau)$$

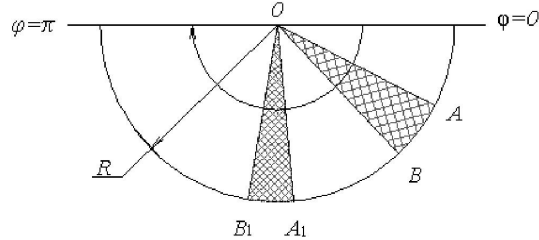


Рис. 2. Вигорання палива з обертальним переміщенням на решітці

Підраховавши, як у п. А, кількість частинок коксу виділеного шару в момент $\tau \left(\frac{3mR^2 h(\varphi)}{\pi \delta^3(\varphi)} \Delta\varphi \right)$ та в момент $\tau + \Delta\tau$

$\left(\frac{3mR^2 \Delta\varphi}{\pi \delta^3(\varphi)} \left[h(\varphi) + (h\omega)' \Delta\tau \right] \left(1 - 3 \frac{\delta' \omega}{\delta} \Delta\tau \right) \right)$ і враховуючи, що ця кількість не

змінюється з часом, та нехтуючи малими вищого порядку, приходимо до диференціального рівняння

$$\frac{(h\omega)'}{h\omega} = 3 \cdot \frac{\delta'}{\delta},$$

звідки

$$h = c_1 \cdot \frac{\delta(\varphi)}{\omega(\varphi)} \delta^2. \tag{16}$$

Аналіз відношення $\frac{\delta(\varphi)}{\omega(\varphi)}$ діаметра частки до її кутової швидкості приводить до висновку $\frac{\delta}{\omega} = const = \frac{\delta_n}{\omega_n}$ (відношення діаметра частинки до її кутової швидкості стало або те саме, що кутова швидкість частинки лінійно залежить від її діаметра).

Із урахуванням останнього факту та значення c_1 , (16) набуває вигляду:

$$h = \frac{h_n}{\delta_n^2} \delta^2(\varphi). \quad (17)$$

Тобто, і у випадку обертального руху палива по решітці залежність висоти шару від діаметра частинки квадратична.

Формула для початкової кутової швидкості руху палива на решітці встановлюється аналогічно до (7) і має вигляд:

$$\omega_n = \frac{2B_p}{R^2 h_n m \rho}. \quad (18)$$

Формули, аналогічні до (11), (12), (13) із пункту А, мають вигляд (19), (20), (21)

$$\delta(x) = \left[\frac{5}{2} A_s (\pi - \varphi) \right]^{\frac{2}{5}}, \quad (19)$$

$$R = \frac{\delta_n^{2,5}}{2,5 \pi A_s}, \quad (20)$$

$$t = \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{5}{2} A_s \right)^{-\frac{2}{5}} \cdot \pi^{\frac{3}{5}} \cdot \frac{\delta_n}{\omega_n} \quad (21)$$

і встановлюються таким самим методом.

У припущенні, що K_s постійна величина протягом процесу вигорання, тобто не залежить від δ і від φ , за методикою, запропонованою в п. А, знаходимо формулу для розрахунку радіуса решітки

$$R^2 = \frac{\delta_n B_p}{2 \pi h_n m K_s} \quad \text{та часу горіння } (t): \quad t = \frac{\rho \delta_n}{2 K_s}.$$

Останній вираз, як і (15), відповідає формулі для розрахунку тривалості горіння палива при постійній швидкості горіння K_s , наведеній у [2], що підтверджує адекватність побудованої моделі процесу горіння.

Висновки. Ефективність спалювання палива із дотриманням екологічних нормативних показників досягається у пристроях з механізованим процесом горіння. А з урахуванням важливості економити паливні ресурси, впровадження такого класу опалювальних котлів є перспективним напрямком. Тому уточнення методики розрахунку топкових пристроїв різної потужності на підставі

адекватних моделей вигорання твердого палива при різних режимних і конструктивних параметрах зони горіння є важливою задачею. Запропонована у даній статті математична модель процесу горіння в шахтно-шаровій механічній топці на колосниковій решітці з поперечною схемою живлення шару з поступальним (обертальним) переміщенням на ній палива дозволяє зробити ряд висновків про основні параметри зони горіння, розрахувати довжину (радіус) решітки та час повного згорання на ній палива.

Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145-р.
2. Основы практической теории горения / Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
3. Сенчук М.П. Механізоване спалювання твердого палива в малогабаритних теплогенераторах // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник – 2014. – Випуск 17. – С. 89-93.
4. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – Санкт-Петербург: ВТИ, НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.
5. Сенчук М.П., Макаров А.С. Результаты исследований скорости горения твердого топлива в слое // Тезисы XI симпозиума по горению и взрыву, 18-96 ноября 1996 г. – Черноголовка: Российская АН, 1996. – Т.1, ч.2. – С. 295-299.

Моделирование процесса горения твердого топлива в шахтно-слоевых топках

М.П.Сенчук, М.Н. Астафьева.

Разработана математическая модель процесса горения твердого топлива в шахтно-слоевых топках с поступательным и вращательным его перемещением на колосниковой решётке. Приведены аналитические уравнения для расчета основных параметров зоны горения

Ключевые слова: шахтно-слоевая схема сжигания, колосниковая решётка с поступательным и вращательным перемещением топлива, скорость горения, математическая модель, дифференциальные уравнения.

Modelling of solid fuel combustion in mine-layers furnaces

M. Senchuk, M. Astafieva

The mathematical model of the combustion of solid fuel in the mine-layer furnaces with translational and rotational movement on grating is developed. The analytical equations of calculating the main parameters of the combustion zone are provided.

Key words: mine-layer burning scheme, grating with forward (rotational) fuel displacement, burn rate, mathematical model, differential equation

Надійшла до редакції 10.04.2015 р.