

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

**ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ  
ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

*заснований у 2001 році*

ВИПУСК 18

Київ 2015

**УДК 697  
В29**

**ISSN 2409-2606**

**Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:**  
науково-технічний збірник. – Вип. 18 /відповідальний редактор  
Е.С. Малкін. – К.: КНУБА, 2015. – 116 с.

У збірнику висвітлюються результати наукових досліджень, питання теорії і практики з опалення, вентиляції і кондиціонування повітря, теплопостачання та газопостачання. Призначений для наукових працівників, викладачів, виробників, докторантів, аспірантів та студентів.

**Редакційна колегія:** доктор техн. наук, професор Е.С. Малкін (відповідальний редактор); канд.техн.наук, професор В.Б Довгалоук (заст. відп. редактора); канд.техн.наук, доцент М.П. Сенчук (відп. секретар); доктор техн.наук, професор О.В. Приймак; доктор техн. наук, професор В.П. Корбут; доктор техн. наук, професор В.М. Михайленко; доктор техн. наук, професор О.Л. Підгорний; канд. техн. наук, професор В.В. Трофімович; доктор техн. наук, професор А. Строй (Польша); доктор техн. наук, професор Г. Собчук (Польша); доктор Г. Глінцерер (Австрія)

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університетабудівництваі архітектури 29 травня 2015 року, протокол № 34.

Адреса редакційної колегії: КНУБА, кафедра теплогазопостачання і вентиляції та кафедра теплотехніки, Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, 03680  
тел. (044) 245-48-33

© Київський національний університет  
будівництва і архітектури

---

---

## ТЕПЛООБМІН, ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, ГАЗОПОСТАЧАННЯ

---

---

УДК 697. 432. 5

### Моделювання процесу горіння твердого палива в шахтно-шарових топках

М.П.Сенчук<sup>1</sup>, М.М.Астаф'єва.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>канд. техн. наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, smp\_21@ukr.net.

<sup>2</sup>канд. 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 затискнутою 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: дугтєве 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 топку 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 топко 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<sub>2</sub>;

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  $\tau$ . 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,

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

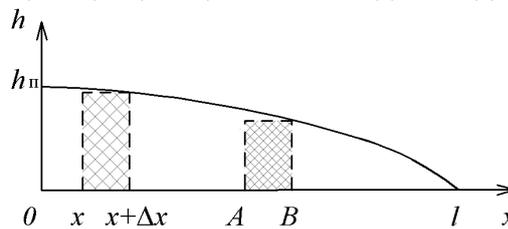


Рис. 1. Вигорання палива з поступальним переміщенням на решітці

Об'єм виділеного шару палива в моменти часу  $\tau$  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  $\tau$  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  $v_n, \delta_n$  – 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];  $\Delta S$  – 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  $\delta$  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 обертого 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  $\varphi$ ;  $h(\varphi)$  – висота шару частинок на радіусі (далі – «в точці»)  $\varphi$ ;  $\omega(\varphi)$  – кутова швидкість частинки в точці  $\varphi$ ;  $R$  – радіус решітки, на якій відбувається спалювання (рис. 2).

Нехай у момент часу  $\tau$  виділений шар палива у вигляді сектора  $AOB$  займає положення між променями  $\varphi$  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  $\tau$  ( $\Delta V_\tau$ ) та в момент  $\tau + \Delta\tau$  ( $\Delta V_{\tau+\Delta\tau}$ ), відповідно, дорівнює:

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

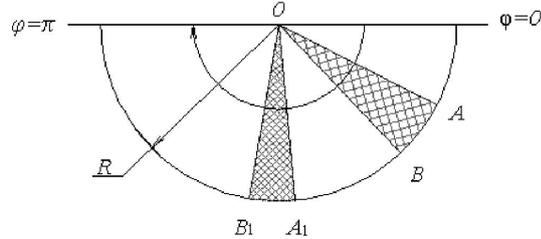


Рис. 2. Вигорання палива з обертальним переміщенням на решітці

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  $\delta$  і від  $\varphi$ , 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.