

В. П. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук**О. А. ШПРАЙБЕР**, д-р техн. наук

Інститут загальної енергетики НАН України, Київ

А. О. ТРОЙНЯК**І. Ю. ТОКАРЕВ**

Трипільська ТЕС, Українка

ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПОВЕРХОНЬ КОТЛА

Проаналізовано існуючі методи розрахунку золотого зношування конвективних теплообмінних поверхонь котла. Отримано узагальнюючі безрозмірні залежності для розрахунку коефіцієнта осадження і швидкості золотих частинок при їх взаємодії з теплообмінними трубами економайзерного пакета. Запропоновано спрощений метод розрахунку зношування труб. Наведено результати тестових розрахунків значень інтенсивності зношування при спалюванні деяких марок вугілля.

1. Вступ. Постановка задачі

Надійність роботи і ресурс котлів теплових електричних станцій (ТЕС) значною мірою залежить від ступеня зношення їх теплообмінних поверхонь. У сучасних умовах і на найближчу перспективу проблема зносостійкості устаткування ТЕС для вітчизняної енергетики набуває особливого значення, що обумовлено станом теплообмінного обладнання, яке перебуває в експлуатації протягом багатьох років. Понад 95 % енергоблоків ТЕС відпрацювали розрахунковий (нормативний) ресурс, який складає 100 тис. годин, а більше половини блоків експлуатується понад 200 тис. годин [1]. Через відсутність досвіду надмірно тривалої експлуатації енергетичного обладнання прогнозування подальшої безпечної роботи ТЕС ускладнюється.

Зазначимо, що зношування енергообладнання підсилюється при роботі ТЕС у нестаціонарних режимах, несвоєчасному проведенні профілактичних і капітальних ремонтів, відсутності на електростанціях засобів моніторингу, які б дозволили персоналу своєчасно отримувати інформацію про зміни в елементах котла під дією штатних і випадкових експлуатаційних факторів. Необхідним етапом реалізації моніторингу є розробка методів розрахунку стану окремих вузлів і елементів котла, зокрема його теплообмінних поверхонь (ТП), з урахуванням аеродинаміки потоку ди-

мових газів, якості вугілля і характеристик золи. Розглянемо деякі з існуючих підходів до розв'язання цієї проблеми.

В роботах [2, 3] запропоновані методи прогнозування ерозійного зносу одиночної труби при потенційному обтіканні її двофазовим потоком та при обтіканні пучка труб турбулентним потоком. Прийнято, що об'єм металу V_0 , який зрізується з ТП при взаємодії з нею частинки золи, може бути обчислений за залежностями, наведеними в [4]. Тоді інтенсивність абразивного зношування (м/с) дорівнює

$$I = \begin{cases} \frac{\eta \kappa u_{g\infty} u_p^2 \rho_g}{4\pi\sigma} (\sin 2\varphi - 3\sin^2 \varphi) & (0^\circ \leq \varphi \leq 18,5^\circ) \\ \frac{\eta \kappa u_{g\infty} u_p^2 \rho_g}{12\pi\sigma} \cos^2 \varphi & \varphi \geq 18,5^\circ, \end{cases} \quad (1)$$

де u_p – швидкість частинок в момент взаємодії з трубою (м/с); δ , η , κ – їх діаметр (м), коефіцієнт осадження і масова витратна концентрація; $u_{g\infty}$ – швидкість газу вдалині від теплообмінної труби (м/с); ρ_g , σ – густина газу (кг/м³) і межа плинності металу труби (Н/м²); φ – кут атаки (кут між напрямком руху частинки і дотичною до поверхні в точці зіткнення). Для визначення коефіцієнта осадження і швидкості частинок в роботах [2, 3] були розроблені відповідні математичні моделі і програмні комплекси.

Рівняння (1) в цілому правильно описує процес зношування і є фізично обґрунтованим,

оскільки згідно з ним величина I залежить від основних параметрів руху газу і частинок, а також властивостей металу. В той же час в ньому не врахована важлива характеристика частинок – їх абразивні властивості. Ця характеристика фігурує в емпіричному нормативному методі теплового розрахунку котлів [5].

Згідно з нормативним методом глибина ерозійного кратера h (мм), який утворюється на теплообмінній трубі у найбільш схильному до зношування ряду гладкотрубних і мембранних шахових пакетів, визначається за формулою

$$h = 9,5 \cdot 10^3 \frac{ak_p k_\mu M}{T_g^{0,35}} \left(\frac{u_g k_w (\sigma_1 - 1)}{k_D \sigma_1} \right)^3 \left(\frac{R_{90}}{d} \right)^{0,5} \tau, \quad (2)$$

де a – коефіцієнт абразивності золи ($\text{м}^2/\text{Н}$); μ – розподілена густина частинок золи ($\text{г}/\text{м}^3$); u_g , T_g – швидкість і температура газів у пакеті ($\text{м}/\text{с}$, К); σ_1 – його поперечний крок (мм); d , τ – діаметр труби (мм) і час її експлуатації (год); R_{90} – залишок золи на ситі з розміром чарунки 90 мкм (%); M , k_p , k_μ , k_w , k_D – коефіцієнти.

Недоліком цієї формули є те, що величина h розраховується за швидкістю газового потоку, в той час як зношування залежить від швидкості частинок u_p . Особливості аеродинаміки потоку, характеристики пакетів і металу труб в нормативному методі враховані відповідними коефіцієнтами, які справедливі лише для певних палив і способів їх спалювання, заданих форм пакетів, проектної аеродинаміки потоку і т. ін. В той же час важливий у фізичному сенсі коефіцієнт осадження частинок η у цьому методі не враховано.

З нашої точки зору, позбавитись частини цих недоліків можна шляхом внесення таких змін у формулу (2): (i) заміни u_g на u_p ; (ii) включення в праву частину (2) коефіцієнта осадження η і виключення коефіцієнтів k_p та σ_1 , що певною мірою враховують відмінність між швидкостями газу і частинок. Ці припущення і були використані нами для побудови спрощеної методики розрахунку інтенсивності зношування на базі результатів [5].

2. Інженерний метод обчислення інтенсивності зношування теплообмінної труби

Серед пошкоджень теплообмінних поверхонь котельного обладнання пилувугільних блоків як на вітчизняних електростанціях, так

і на ТЕС промислово розвинутих країн досить частим є абразивне зношування труб економайзерів. Як зазначалося вище, формула (2) призначена для прогнозування величини h у найбільш небезпечному, з огляду зношування, ряду труб. З практики експлуатації котлів відомо, що в економайзерному пакеті найбільше зношуються труби другого ряду. Нижче пропонується метод розрахунку інтенсивності зношування таких труб.

Перепишемо формулу (2) з урахуванням запропонованих нами припущень:

$$h = 9,5 \cdot 10^3 \frac{a\eta k_\mu M}{T_g^{0,35}} \left(\frac{u_p k_w}{k_D} \right)^3 \left(\frac{R_{90}}{d} \right)^{0,5} \tau. \quad (3)$$

Для визначення швидкості частинок u_p в момент зіткнення зі стінкою труби можна було б скористатися результатами моделювання обтікання економайзерного шахового пакета потоком димових газів з частинками золи [3]. Проте цей шлях пов'язаний з деякими незручностями. Вони полягають у тому, що у кожному конкретному випадку потрібно багаторазово розв'язувати досить складні диференціальні рівняння руху газу і частинок. Тому було вирішено побудувати просту "емпіричну" формулу для розрахунку швидкості частинок u_p як функції характеристик пакета труб і двофазового потоку в ньому.

Для розв'язання цієї задачі найбільш доцільно скористатись методами теорії подібності [6]. Згідно з π -теоревою цієї теорії, якщо існує фізично значущий вираз, що включає в себе n розмірних фізичних змінних і ці змінні описуються за допомогою k незалежних фундаментальних фізичних величин, то вихідний вираз еквівалентний співвідношенню, що включає безрозмірні числа подібності, побудовані із початкових змінних. При цьому кількість цих чисел суттєво менше кількості розмірних величин, що спрощує розв'язання поставленої задачі.

Застосуємо ці положення теорії подібності для знаходження зв'язку між швидкістю частинок, характеристиками пакета труб і потоку димових газів у ньому. В загальному випадку вираз для u_p має вигляд:

$$u_p = f(T_{g\infty}, T_w, u_{g\infty}, \rho_g, \nu_g, d, s_1, s_2, \delta, \rho_p), \quad (4)$$

де ν_g – в'язкість газу; T_w – температура труби; s_1 , s_2 – розміри поперечний і поздовжній кро-

ки пакета; ρ_p – густина частинки. Аналогічний вигляд має вираз для η .

Таким чином, величини η і u_p залежать від 10 розмірних величин, які мають чотири незалежні розмірності – кг, м, с, К. З огляду на це еквівалентне рівняння для u_p буде містити шість чисел подібності, які можна побудувати, наприклад, у вигляді:

$$\Theta = T_w/T_{g\infty}, \quad \sigma_1 = s_1/d, \quad \sigma_2 = s_2/d, \quad R = \rho_p/\rho_g, \\ \text{Re} = u_{g\infty}d/\nu_g, \quad \text{Stk} = u_{g\infty}\rho_p\delta^2/(18d\nu_g\rho_g). \quad (5)$$

З метою спрощення рівняння з нього було виключено число Θ , яке на практиці змінюється у досить вузьких межах і, крім того, чинить незначний вплив на рух частинок. Вважалося, що зношування труб відбувається при деякій середній температурі, а густина і в'язкість газу, які залежать від T_g , приймають значення $\bar{\rho}_g, \bar{\nu}_g$. Крім того, замість числа Стокса зручніше взяти комбінацію трьох останніх чисел подібності в (5) $\text{Re}^{-1}R^{-1}\text{Stk}$, що зводиться до симплекса $D = \delta/d$. У підсумку рівняння зв'язку між швидкістю частинок і визначальними числами подібності записується у вигляді:

$$U_p = A\sigma_1^\alpha\sigma_2^\beta R^\gamma \text{Re}^\epsilon D^\zeta, \quad (6)$$

де $U_p = u_p/u_{g\infty}$. Рівняння для η аналогічне (6) і тут не наводиться.

Таким чином, необхідно знайти 6 невідомих величин. Щоб побудувати план обчислювального експерименту, було вирішено реалізувати чверть-репліку повного факторного експерименту 2^{k-2} , де $k = 5$ – розмірність факторного простору. Загальна кількість “дослідів” у цьому випадку становить 8, що забезпечує достатню перевірку адекватності моделі. Згідно з рекомендаціями [6, 7], план було побудовано таким чином (тут і далі використовуються кодові позначення чисел подібності з правої частини (6) x_i ; числа подібності приймають значення на

двох рівнях – верхньому і нижньому, яким відповідають значення $x_i = +1$ і -1). Для x_1, x_2 та x_3 будуюмо повний факторний експеримент 2^3 ; крім того, задаємо $x_4 = x_1x_2, x_5 = x_1x_3$. Отриманий в результаті план представлено в табл. 1.

Неважко переконатись, що цей план задовольняє такі вимоги:

1) $\sum_{r=1}^N x_{ir} = 0, i = 1, \dots, k$ (N – загальна кількість дослідів, $N = 8$), тобто незалежні змінні x_i розташовані у п'ятивимірному просторі симетрично відносно центра експерименту;

2) $\sum_{r=1}^N x_{ir}x_{jr} = 0, i \neq j, i, j = 1, \dots, k$, тобто вектори, що зв'язують центр експерименту з вісьмома дослідними точками, взаємно ортогональні;

3) $\sum_{r=1}^N x_{ir}^2 = N$, тобто всі дослідні точки рівновіддалені від центра. Згідно з теорією [7] подібний план дає найбільш заповнений інформаційний профіль.

На основі відомих рекомендацій [5] було обрано такі значення чисел подібності: мінімальні – $\sigma_1 = 2; \sigma_2 = 1; \text{Re} = 1450; R = 3500$; максимальні – $\sigma_1 = 3; \sigma_2 = 1,5; \text{Re} = 3800; R = 5070$. Щоб задати значення симплекса D , було проведено обробку літературних даних щодо складу золи на шести українських електростанціях – Бурштинській, Добротвірській, Запорізькій, Курахівській, Ладиженській і Трипільській. В результаті було встановлено, що середній розмір частинок коливається у межах $\bar{\delta} = 60 \div 100$ мкм. Крім того, аналіз проб золи з Трипільської ТЕС показав, що її склад підкоряється закону Розіна – Раммлера

$$R(\delta) = \exp\left[-(\delta/\delta_*)^m\right], \quad (7)$$

де R – залишок на ситі з чарунками δ ; $\delta_* = 48$ мкм; $m = 0,882$. Тоді функція розподілу частинок за розмірами має вигляд

$$g(\delta) = -dR/d\delta = m\delta_*^{-m}\delta^{m-1}\exp\left[-(\delta/\delta_*)^m\right]. \quad (8)$$

Обчислюючи середній розмір частинок, знаходимо

$$\bar{\delta} = \int_0^\infty \delta g(\delta) d\delta = \delta_* \Gamma(m^{-1} + 1) \approx 51 \text{ мкм} \quad (9)$$

(тут Γ – гамма-функція). Приймаючи $\bar{\delta}_{\min} = 50$ мкм, $\bar{\delta}_{\max} = 100$ мкм, маємо такі значення числа подібності D : $1,56 \times 10^{-3}$ і $3,12 \times 10^{-3}$.

Таблиця 1

Номер дослідів	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1	-1	+1
7	+1	-1	-1	-1	-1
8	-1	-1	-1	+1	+1

3. Результати розрахунків

3.1 Розрахунки параметрів руху димових газів і частинок золи

Для обраних чисел подібності було проведено 8 числових експериментів згідно з планом табл. 1. В цих експериментах за методикою [3] розраховувались параметри руху газового потоку при низхідному обтіканні ним економайзерного пакета з шаховим розташуванням труб. Далі, у відомому газовому полі розраховувались коефіцієнт осадження і швидкість частинок в момент зіткнення їх з теплообмінною трубою. В цих розрахунках в рівняннях руху частинок враховувались сили аеродинамічного опору, Магнуса і тяжіння.

Знайдені значення коефіцієнтів осадження і швидкості частинок було оброблено методом найменших квадратів; в результаті отримано такі узагальнюючі формули для η і U_p :

$$\eta = 0,956\sigma_1^{-0,12}\sigma_2^{-0,085}Re^{0,117}R^{0,096}D^{0,28}, \quad (10)$$

$$U_p = 1,65\sigma_1^{-0,424}\sigma_2^{-0,121}Re^{-0,047}R^{0,026}D^{-0,068}. \quad (11)$$

На рис. 1 наведено співставлення даних числових експериментів і результатів розрахунків за формулами (10), (11). Максимальне відхилення $\eta_{розр}$ від $\eta_{експ}$ (рис. 1, а) і $U_{p,розр}$ від $U_{p,експ}$ (рис. 1, б) становить 5% і 3,7%, відповідно.

Таким чином, залежності (10), (11) задовільно апроксимують дані числових експериментів.

3.2 Розрахунки ерозійного зношування

Для розрахунків величини h за формулою (3) потрібно мати значення коефіцієнта абразивності a . Згідно з [5] величина a обчислюється за формулою

$$a = 0,045(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 - 44) \cdot 10^{-12}. \quad (12)$$

де SiO_2 , Al_2O_3 – вміст оксидів у золі, %.

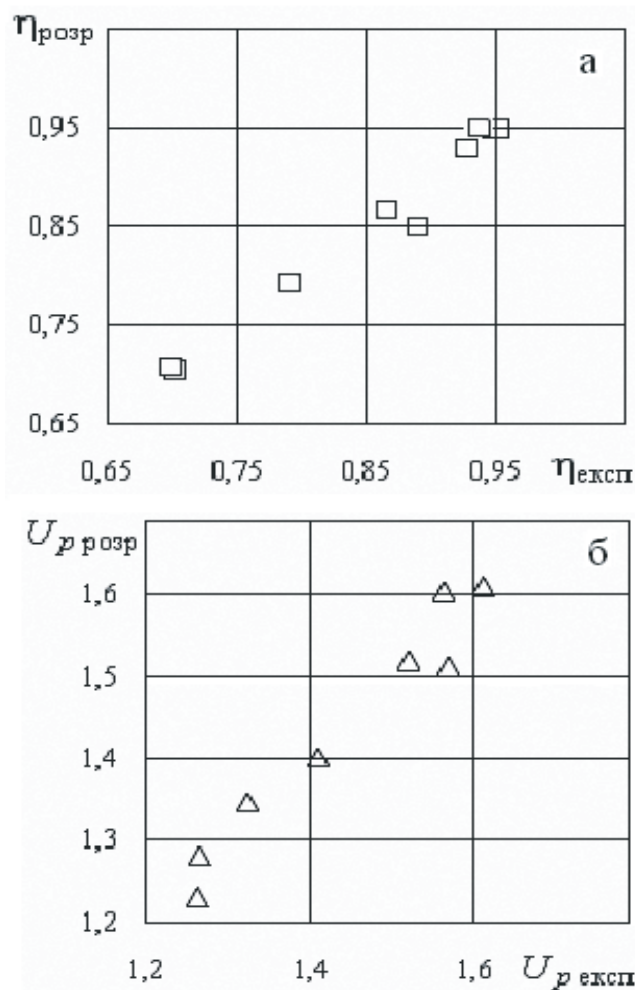


Рис. 1

Аналіз результатів розрахунків за цією формулою показав, що величина a не завжди задовільно співпадає зі значеннями коефіцієнта абразивності, отриманими експериментально згідно з ГОСТ 21708 [5]. У зв'язку з цим нами була підібрана формула, яка більш точно описує експериментальні дані:

$$a = (0,731 + 0,598 \ln k_c) \cdot 10^{-12}, \quad (13)$$

де k_c – коефіцієнт кислотності вугілля,

Таблиця 2

Вугілля	№ рядка з табл. II [5]	Хімічний склад золи, % (на безсульфатну масу)								$a \cdot 10^{12}, \text{м}^2/\text{Н}$		
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Дані [5]	Формула (12)	Формула (13)
Екібастузьке	54	62,7	28,3	5,1	1,1	1,1	0,8	0,6	0,3	2,2	2,12	2,20
Підмосковне	61	48,2	35,6	9,6	0,8	4,1	0,7	0,7	0,3	1,7	1,79	1,75
АШ	14	51,4	22,4	15,3	0,7	3,8	1,6	3,3	1,5	1,4	1,34	1,37
Донецьке пісне	13	49,9	22,3	17,5	0,7	4	1,6	2,8	1,2	1,4	1,27	1,32
ГСШ	4	50,5	24,2	16,7	0,6	2,5	1,4	3,1	1	1,4	1,38	1,40
Гусино-озерське	100	51,1	23,5	12,2	1,3	5,7	2,8	2,0	1,2	1,4	1,38	1,42
Куучекінське	52	63,8	24,8	5,9	0,7	1,4	0,8	0,6	2	2	2,01	2,00

$$k_c = \frac{Al_2O_3 + SiO_2 + TiO_2}{CaO + Fe_2O_3 + K_2O + MgO + Na_2O} \cdot \text{Тут, як і вище, вміст оксидів у \%}$$

В табл. 2 наведено співставлення коефіцієнтів абразивності a , розрахованих за формулами (12), (13) і експериментальних даних для золи вугілля родовищ, вказаних в [5].

З цієї таблиці видно, що найбільш тісна кореляція між експериментальними і розрахованими значеннями a має місце при обчисленні коефіцієнта абразивності за формулою (13).

Розрахунки зношування, яке може виникнути при спалюванні вугілля наведених в таблиці родовищ, виконані з використанням залежностей (3), (10), (11) і (13), показали, що їх результати задовільно узгоджуються з експериментом у разі використання в (3) підгоночного коефіцієнта $k_{II} = 1,5$. З урахуванням цієї особливості виконано тестові розрахунки зношування труби, розташованої в другому ряду економайзерного пакета котла ТПП-210А Трипільської ТЕС. Значення вихідних величин для розрахунків наведені в табл. 3.

Частка золи, що виноситься димовими газами, при роботі котла в номінальних режимах згідно з проектною документацією на цю ТЕС становить 0,7. Величини коефіцієнтів M , k_{II} , k_w , k_D вибиралися у відповідності з рекомендаціями [5]. У 2008 р. на станції спалювалось донецьке вугілля марок АШ і П, причому частка

ВИСНОВКИ

Запропоновано спрощену формулу для розрахунку глибини кратера, що утворюється на поверхні труби при обтіканні її потоком димових газів з частинками золи. Отримано вирази для обчислення коефіцієнта осадження і швидкості частинок за параметрами обтікання, а також коефіцієнта абразивності за кислотністю вугілля.

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.06 р. "Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року".
2. Яценко В. П. Прогнозування ерозійного зношування теплообмінних поверхонь котельного устаткування // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – № 13. – С. 81 – 85.
3. Шрайбер А. А., Яценко В. П. Моделирование абразивного износа конвективных теплообменных поверхностей котла // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 17. – С. 37 – 40.
4. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles // Wear. – 1960. – Vol. 3, No. 2. – P. 87 – 103.
5. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
6. Веников В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
7. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

Таблиця 3

$u_{g_{\infty}}$ М/с	σ_1	σ_2	Re	R	D	T_g, K	$\tau, год$
8,0	2,6	1,25	3746	4063	$1,563 \cdot 10^{-3}$	723	$6,5 \cdot 10^4$

Таблиця 4

Постачальник вугілля	Марка вугілля	k_c	$a \cdot 10^{12}$, м ² /Н	$\mu, г/м^3$	$h, мм$
ЦЗФ "Свердловська"	АШ	2,8	1,35	5,7	1,58
ГЗФ "Червонопартизанська"	АШ	3,1	1,41	10,8	3,14
ГЗФ "Центросоюз"	АШ	3,0	1,38	10,4	2,99
ГЗФ "Червонолуцька"	П	1,7	1,04	6,73	1,45

П становила 8,1%. Розраховані для цих палив значення k_c , a , μ і h наведені в табл. 4.

Наведені результати свідчать, що при спалюванні вугілля однієї марки, яке надходить від різних постачальників, значення h можуть суттєво відрізнятись. Зокрема, для вугілля марки АШ з табл. 4 отримано максимальні і мінімальні значення інтенсивності зношування, які відрізняються вдвічі. Для вугілля марки П при тих же режимах спалювання прогнозна інтенсивність зношування $I = 2,2 \times 10^{-8}$ м/год, що в 2,15 рази менше максимальної величини h , отриманої для АШ.

Запропонований інженерний метод обчислення інтенсивності зношування теплообмінних поверхонь дозволяє прогнозувати величину I при спалюванні вугілля різних марок. При використанні запропонованого методу може бути підібрано паливо з прийнятними для експлуатації котлів значеннями інтенсивності зношування.