

УДК 621.182.42:532.529

В.П. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ТЕПЛОБІМНИХ ПОВЕРХОНЬ КОТЕЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

Запропоновано метод прогнозування ерозійного зношування теплообмінної поверхні при обтіканні її газовим потоком із твердими частинками. Для визначення характеристик частинок у момент їх зіткнення з поверхнею розроблено модель обтікання, в якій враховано сили Магнуса, Сафмена і термофореза. Для умов обтікання труби економайзера виконано числові розрахунки інтенсивності ерозії, викликані частинками золи.

Значну кількість відмов у роботі енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС) спричинено пошкодженнями котельного устаткування, зокрема поверхонь нагрівання. За даними [1], у 2004 році на блочному устаткуванні конденсаційних ТЕС України сталося 262 пошкодження теплообмінних поверхонь (ТП), що становить 56,9% усіх порушень на енергоблоках. Понад 60% цієї кількості припадає на пароперегрівачі та водяні економайзери. Аналіз пошкоджень за класифікаційними ознаками показує, що основними причинами виходу з ладу котельних труб є їх корозійно-ерозійне зношування, частка якого, згідно з [1], на окремих блоках може сягати 66%. Зазначимо, що порівняно з 2003 роком, у 2004 році кількість пошкоджень ТП збільшилась на 6,3%.

Відомо, що основною причиною ерозії поверхонь котельних труб є взаємодія з ними частинок золи, які містяться у продуктах згоряння. Проблеми ерозійного зношування виникають навіть при спалюванні проектного палива у проектних режимах. Але вони особливо посилюються при використанні високозольного вугілля, постачання якого на ТЕС останнім часом здійснюється досить часто. У зв'язку з цим розробка методів прогнозування кількісних показників ерозії теплообмінних поверхонь котлів є актуальною.

Розглянемо поперечне обтікання теплообмінної труби ниспадним потоком димових газів з частинками золи. Схему течії наведено на рис. 1. Тут $U_{g\infty}, T_{g\infty}$ – швидкість і температура газу вдалині від труби; D – її діаметр; φ – кут між віссю x і радіус-вектором r , який проходить через точку зіткнення золової частинки з трубою. Вважатимемо, що течія газу має дві області – потенціальне ядро і розташований на поверхні труби пограничний шар товщиною d .

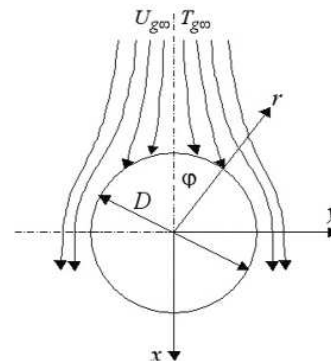


Рис. 1. Схема обтікання

Процес взаємодії частинок з поверхнею, яка обтікається, характеризується коефіцієнтом осадження η . Ця величина визначається як відношення числа частинок, що зіткнулися з трубою, до загального їх числа, які могли б зіткнутись, якби рухались прямолінійно. При рівномірному розподілі частинок вдалині від труби $\eta = (y_p - y_l)/D$, де y_l, y_p – ліва і права границі інтервалу значень ординат точок старту y , таких, що при $y \in (y_l, y_p)$ частинки осідають, а при $y \notin (y_l, y_p)$ не осідають на поверхню труби.

При зіткненні частинок з трубою вони видаляють з її поверхні деяку кількість матеріалу об'ємом $V = n V_0$, де n – число зіткнень, V_0 – об'єм, який зрізається однією частинкою. Число зіткнень в одиницю часу на одиницю довжини труби може бути обраховано за формулою

$$n = \frac{6\eta\mu D U_{g\infty} \rho_g}{\pi \delta^3 \rho}, \quad (1)$$

де μ, δ, ρ – концентрація, діаметр і густина частинок, ρ_g – густина газу.

Глибина кратера, який утворюється від золотого зношування, віднесена до площі лобової поверхні труби

$$h = \frac{12\eta\mu U_{g\infty} \rho_g V_0}{\pi^2 \delta^3}. \quad (2)$$

Вивченню механізму зіткнення одиничних частинок з поверхнею і визначенню кількості матеріалу, що видаляється при зіткненні, в літературі приділяється значна увага [2-4]. Аналіз відомих даних дозволяє зробити висновок, що основними факторами, які впливають на величину V_0 і ерозії в цілому, є кут атаки α (кут між напрямом руху частинки і дотичною до поверхні в точці зіткнення), швидкість U руху частинки, її абразивні властивості і міцнісні характеристики матеріалу поверхні обтікання.

Теплообмінне обладнання котельних агрегатів, зокрема труби пароперегрівачів, колекторів, економайзерів виготовляється з маловуглецевої, відносно пластичної сталі. Для таких матеріалів об'єм металу V_0 , що зрізується з ТП, може бути обчислений за залежностями, наведеними в [4]. З використанням результатів [4] глибина кратера

$$h = \begin{cases} \frac{\eta \mu U_{g\infty} U^2 \rho_g}{4\pi\delta} (\sin 2\alpha - 3\sin^2 \alpha) & (0^\circ \leq \alpha \leq 18,5^\circ) \\ \frac{\eta \mu U_{g\infty} U^2 \rho_g}{12\pi\sigma} \cos^2 \alpha & \alpha \geq 18,5^\circ, \end{cases} \quad (3)$$

де σ – межа плинності металу.

Для обчислення h за рівняннями (3) необхідно мати інформацію про коефіцієнт осадження частинок і величину їх швидкості U в момент зіткнення. Ці величини можуть бути отримані з моделі обтікання циліндричного тіла пилогазовим потоком.

Аналіз літературних даних, які стосуються поперечного обтікання циліндра двофазовим потоком, показує, що в більшості випадків розглядаються моделі зі спрощеними припущеннями відносно силових факторів f , що діють на частинки. Зокрема, в роботі [5] з усього набору f враховувалась лише сила аеродинамічного опору f_a , а в [6] f_a і сила тяжіння f_g . В роботі [7] рівняння руху частинок доповнені виразами для сил Сафмена f_s , термофорезу f_t і турбофорезу $f_{тф}$. Раніше нами [8] розглянуто неізотермічне обтікання теплообмінної поверхні двофазовим потоком, де, крім f_a , f_g , f_s , f_t , враховувалась також сила Магнуса f_M . Ерозійні процеси в [6-8] не розглядалися. Числовий аналіз золотого зношення циліндричної труби, виконаний в [5] в ізотермічній постановці без урахування f_M , f_s , f_t , f_g і пограничного шару, на нашу думку, не дає достатньої інформації про закономірності ерозії в реальних котельних агрегатах. Нижче наводяться результати розробки моделі для обчислення

величин η , U , в якій перераховані вище обмеження усунуті.

Рух частинок навколо горизонтального циліндра (рис. 1) описується лагранжевими рівняннями

$$m du_x / d\tau = f_{ax} + f_{Mx} + f_{Sx} + f_{Tx} + f_g, \quad (4)$$

$$m du_y / d\tau = f_{ay} + f_{My} + f_{Sy} + f_{Ty}, \quad (5)$$

де m – маса частинки, u_x , u_y – її поздовжня (вздовж осі x) і поперечна складові швидкості.

Величини силових факторів будемо знаходити за залежностями, наведеними в [8]. На відміну від [8] при обчисленні коефіцієнтів C_M і C_S у виразах для сил Магнуса і Сафмена скористаємося експериментальними даними, отриманими нами раніше [9, 10]. Для розв'язання системи (4), (5) вона повинна бути доповнена даними про поля швидкостей $U_g(r, \varphi)$ і температур $T_g(r, \varphi)$ газу. Рівняння ліній течії ψ для потенціального потоку має вигляд $\psi = |U_{g\infty}| y (1 - 0,25D^2 / (x^2 + y^2))$. Складові швидкості газу знаходяться з виразів $u_{gx} = d\psi/dy$ і $u_{gy} = -d\psi/dx$.

Для знаходження швидкості газу U_g у пограничному шарі необхідно перейти від декартової системи координат до полярної. Згідно з теорією пограничного шару Г. Шліхтінга [11] величину швидкості можна апроксимувати залежністю $U_g = U_g^* (2Z - Z^2)$, де U_g^* – швидкість газу на межі пограничного шару; Z – безрозмірна відстань до поверхні циліндра, $Z = (2r - D)/2d$. В рамках такого підходу виникає задача знаходження товщини пограничного шару. Згідно з тією ж теорією, відношення товщини втрати імпульсу d^* до d знаходиться з виразу

$$d^*/d = 0,3 - 8,3 \cdot 10^{-3} \Delta, \quad (6)$$

де величина $\Delta \in [-12, 12]$ і в першому наближенні може бути прийнята рівною нулю.

Товщина втрати імпульсу є функцією числа Рейнольдса Re потоку, що набігає, і кута φ

$$d^* = D(2Re)^{-0,5} f(\varphi), \quad (7)$$

де $Re = U_{g\infty} \cdot D/\nu$, ν – в'язкість газу.

Обробка даних [11] дозволила нам отримати кусочно-неперервну функцію, яка апроксимує залежність $f(\varphi)$ у чотирьох діапазонах зміни кута φ

$$f(\varphi) = \begin{cases} 0,47, & 0 \leq \varphi < 20^\circ; \\ 0,51 + (0,875\varphi - 37,5)\varphi \cdot 10^{-4}, & 20 \leq \varphi < 60^\circ; \\ 1,35 + (2,5\varphi - 275)\varphi \cdot 10^{-4}, & 60 \leq \varphi < 80^\circ; \\ 4,95 + (7,5\varphi - 1125)\varphi \cdot 10^{-4} & 80 \leq \varphi < 100^\circ \end{cases} \quad (8)$$

Температура газу $T_g(r, \varphi)$ вдалині від циліндра незмінна. Вона змінюється лише в безпосередній близькості від його поверхні – в межах теплового пограничного шару товщиною d_T . Аналіз літератури показав, що величину d_T можна знайти з виразу $d_T = kd$, k – коефіцієнт, $k > 1$. Згідно з [6] при $\varphi = 0$ $k = 2,3$ і суттєво не змінюється при збільшенні φ . Прийmemo це значення k для подальших розрахунків d_T .

Будемо вважати, що перенос тепла в пограничному шарі здійснюється лише теплопровідністю. Тоді, для стаціонарних умов поле температур у циліндричній області товщиною d_T задовольняє рівнянню Лапласа

$$\frac{d}{dr} \left(r \lambda \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) = 0 \quad (9)$$

з крайовими умовами $T_g = T_w$ при $r = 0,5D$ і $T_g = T_g^* \approx T_w + k_p (T_{g\infty} - T_w)$ при $r = 0,5D + d_T$. Тут λ – коефіцієнт теплопровідності газу; T_w – температура поверхні циліндра; k_p – коефіцієнт, який враховує "розмитість" температурного поля на межі теплового пограничного шару і набігаючого потоку. Нами прийнято $k_p = 0,95$.

Розв'язок (9) з наведеними граничними умовами має вигляд

$$T_g = T_w - (T_w - T_g^*) \ln(2r/D) K_D^{-1}, \quad (10)$$

де $K_D = \ln((D + 2d)/D)$.

З (10) отримаємо

$$dT_g/dr = K_D (T_w - T_g^*) r^{-1}. \quad (11)$$

Динамічні характеристики частинок після взаємодії їх з ТП знаходились із співвідношень

$$u'_n = k_n u_n, \quad u'_\tau = 0,143(5u_\tau + 2k_\tau u_\tau + (1 - k_\tau)\delta\omega), \quad (12)$$

$$\omega' = \omega - 0,7(1 - k_\tau)(\omega - 2u_\tau\delta^{-1}), \quad (13)$$

де k_n , k_τ – коефіцієнти відновлення нормальної u_n і тангенціальної u_τ складових швидкості частинок; $-1 \leq k_n \leq 0$; $-1 \leq k_\tau \leq 1$; ω – кутова швидкість частинок.

Спільне розв'язання рівнянь (4) – (8), (10), (13) дозволяє розрахувати коефіцієнти осадження частинок та їх швидкості U . На рис. 2 наведено траєкторії частинок $\delta = 40$ мкм, побудовані за результатами розрахунків неізотермічного ($T_{g\infty} = 1100$ К, $T_w = 500$ К) обтікання циліндра діаметром $D = 0,032$ м при швидкості потоку $U_{g\infty} = 10$ м/с, $k_n = -0,7$, $k_\tau = 0,3$. Тут $X = x/D$, $Y = y/D$. Рис. 2, а

відповідає розрахункам з урахуванням у рівняннях (4), (5) всіх силових факторів (варіант А), рис. 2, б – тільки f_a , f_g (варіант Б). Величина кутової швидкості ω в момент зіткнення з циліндром обраховувалась за залежністю $\omega = U_{g\infty}/\delta$.

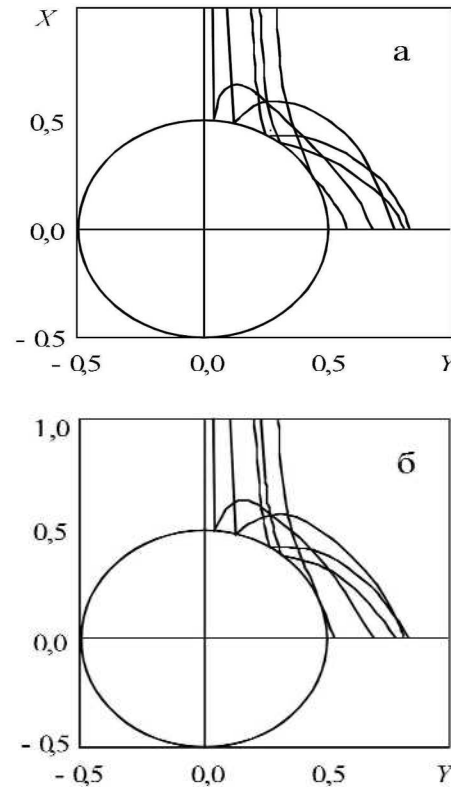


Рис. 2. Траєкторії частинок

З порівняння наведених даних видно, що під дією всіх силових факторів частинки зміщуються в напрямку осі потоку. В кінцевому підсумку це призведе до зростання коефіцієнта осадження η і до збільшення ерозії теплообмінної поверхні.

У табл. 1 і 2, як приклад, наведено результати розрахунків нормальної і тангенціальної складових швидкості частинок і кута φ для зазначених вище умов обтікання. Аналіз цих даних показує, що врахування у рівняннях (4), (5) всіх силових факторів істотно не впливає на величину u_n , u_τ і, відповідно, модуля повної швидкості U в момент зіткнення частинок з циліндром. В ізотермічних умовах величини u_n , u_τ більші, ніж у неізотермічних. Оскільки згідно з (3) ерозія поверхонь посилюється з ростом швидкості частинок, то при збільшенні $T_{g\infty}$ слід було б чекати її зменшення. В реальних умовах абразивне зношування залежить не тільки від u_n , u_τ , а й від механічних властивостей матеріалу ТП, які суттєво змінюються зі зміною температури газу, а отже і самої поверхні.

Таблиця 1. Результати розрахунків при $T_{g\infty} = T_w = 300$ К

Величина	Значення величини у варіантах									
	А					Б				
φ , град	4,2	11,1	31,0	34,3	48,1	5,9	17,9	36,5	43,2	57,9
u_n , м/с	7,7	7,5	6,7	6,4	5,2	7,7	7,5	6,6	6,1	4,7
u_τ , м/с	0,6	1,5	4,0	4,3	5,8	0,8	2,4	4,9	5,7	7,5
U , м/с	7,7	7,6	7,8	7,7	7,8	7,7	7,9	8,2	8,3	8,9

Таблиця 2. Результати розрахунків при $T_{g\infty} = 1100$ К, $T_w = 500$ К

Величина	Значення величини у варіантах									
	А					Б				
φ , град	5,5	22,5	47,2	55,3	80,5	8,0	23,9	48,6	57,7	
u_n , м/с	6,6	6,3	4,3	4,3	1,3	6,6	6,3	5,0	4,2	
u_τ , м/с	0,6	2,6	5,4	6,3	8,0	0,9	2,8	5,7	6,6	
U , м/с	6,6	6,5	7,6	7,6	8,1	6,7	6,9	7,6	7,8	

Отримані результати моделювання обтікання циліндра дозволяють перейти до прогнозування ерозійного зношування теплообмінних поверхонь. Виконаємо розрахунки величини h для умов обтікання труби економайзера діаметром $D = 0,032$ м димовими газами з частинками золи, характеристики якої наведені в [12]. Згідно з [5] швидкість димових газів на ділянці газоходу, де розташовані труби економайзера, має величину $U_g = 7$ м/с.

Гранулометричний склад золи може бути апроксимований залежністю у формі Розіна – Рамлера

$$R(\delta) = 100 \exp\left[-(\delta/\delta_*)^m\right], \quad (14)$$

де $R(\delta)$ – залишок на ситі з комірками δ , %; δ_* – розмір комірки сита, залишок на якому дорівнює 36,8 %, $\delta_* = 0,048$ мм; $m = 0,882$.

Котельні безшовні труби для пароперегрівачів, економайзерів і колекторів виготовляються зі сталі марки 20. Аналіз довідкової літератури [13] для цієї сталі дозволив підібрати апроксимуючу залежність $\sigma(T_w)$ в інтервалі температур $293 \leq T_w \leq 1200$ К:

$$\sigma = \sigma_0(1,35 - 0,354T_w/T_{w0}), \quad (15)$$

де σ_0 – межа плинності при температурі $T_{w0} = 293$ К.

За цими вихідними даними для кожної фракції обчислювались величини η , u_n , u_τ , α , φ , які використовувались у розрахунках інтенсивності

ерозії за залежностями (3). На рис. 3 наведено деякі результати розрахунків залежності $h(\varphi)$ для варіантів А (суцільні лінії) і Б (штрихові лінії). Аналіз результатів показав, що величина максимального зношування h_{\max} викликаного дрібними фракціями ($\delta \leq 40$ мкм) у варіанті А де-що більша, ніж у варіанті Б. Для крупніших фракцій ($\delta \geq 40$ мкм) значення h_{\max} в обох варіантах майже не відрізняються. Зазначимо, що в обох варіантах величина h_{\max} для частинок $\delta = 40$ мкм майже в 20 разів більша, ніж для частинок $\delta = 20$ мкм.

Частинкам кожної фракції відповідає граничне значення кута φ (позначимо його $\varphi_{\text{гр}}$). У наведеному на рис. 3 прикладі, для частинок $\delta = 20$

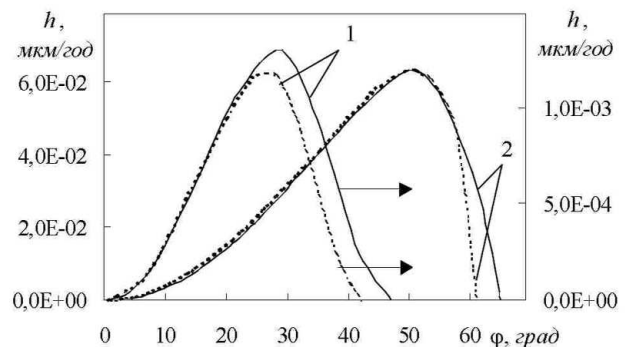


Рис. 3. Залежність $h(\varphi)$:

1 – $\delta = 20$ мкм; 2 – $\delta = 40$ мкм

мкм $\varphi_{\text{гр}}^A = 47^\circ$, а $\varphi_{\text{гр}}^B = 42^\circ$, тобто при врахуванні в (4), (5) всіх сил граничне значення кута більше. Для даної золи перевищення $\varphi_{\text{гр}}^A$ над $\varphi_{\text{гр}}^B$ має місце і для частинок інших фракцій. В кінцевому підсумку це призводить до збільшення інтенсивності ерозії.

За результатами розрахунків інтенсивності ерозії, викликані кожною фракцією при врахуванні в (4), (5) f_a, f_M, f_S, f_T, f_g , отримана підсумкова залежність $h(\varphi)$, представлена на рис. 4.

З наведених даних видно, що для даної золи за вибраних умов обтікання максимальна інтен-

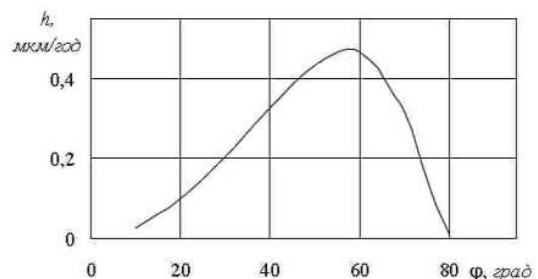


Рис. 4. Профіль зношування лобової поверхні труби

сивність ерозії має місце при куті $\varphi \approx 56^\circ$, що відповідає результатам експериментальних досліджень. За даними [14] зношування труб, захищених індивідуальними засобами захисту, за 6 місяців експлуатації мало величину $h = 1,5 - 2$

мм. У випадку, наведеному на рис. 4, за такий час $h = 2,1$ мм. Таким чином, запропонована модель дозволяє задовільно прогнозувати величину ерозійного зношування теплообмінних поверхонь котельних агрегатів.

1. Аварійність на об'єктах електроенергетики України у 2004 році. Огляд. – К., 2005. – 195 с.
2. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Соотношение теплового и эрозионного компонентов при теплоэрозионном разрушении материалов в сверхзвуковом гетерогенном потоке // V Минский международный форум по тепло – и массообмену, Минск, 2004. – Т. 1. – С. 318-319.
3. Табаков В., Мэйлек М.Ф., Хамед А. Измерение лазером характеристик отскакивания твердых частиц при соударениях их с поверхностью из алюминиевого (2024) и титанового (AI – 4V) сплавов // Аэрокосмическая техника. – 1987. – № 12. – С. 58-64.
4. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles // Wear. – 1960. – Vol. 3, № 2. – P. 87-103.
5. Жангаскин К.К., Когай Г.Н. Численный анализ эрозионного износа при поперечном обтекании цилиндра газообразным потоком // Теплоэнергетика. – 1999. – № 4. – С. 57-59.
6. Белов С.Ю., Рундыгин Ю.А., Усик Б.В. Расчет характеристик инерционного движения частиц при поперечном обтекании цилиндра газозвесью // ИФЖ. – 1982. – Т. 43, № 3. – С. 499-500.
7. Спокойный Ф.Е., Горбис З.Р. Особенности осаждения тонко диспергированных частиц из охлаждаемого газового потока на поперечно обтекаемой поверхности теплообмена // ТВТ. – 1981. – Т. 19, № 1. – С. 182-199.
8. Кудрявцев Н.А., Миронова М.В., Яценко В.П. Поперечное обтекание цилиндрической теплообменной поверхности двухфазным потоком // ИФЖ. – 1990. – Т. 59, № 6. – С. 917-923.
9. Яценко В.П., Александров В.В. Измерение силы Магнуса при умеренных числах Рейнольдса // Прикладная гидромеханика. – 2001. – Т. 3, № 3. – С. 83-87.
10. Яценко В.П. Определение силы, действующей на сферическую твердую частицу в потоке со сдвигом // Физика аэродисперсных систем. – 2002. – вып. 39. – С. 240-248.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
12. Технология комплексной переработки золы уноса тепловых электростанций // Химия твердого топлива. – 2002. – № 5. – С. 87-91.
13. Раскатов В.М., Чуенков В.С., Бессонова Н.Ф., Вейс Д.А. Машиностроительные материалы. Краткий справочник. М.: Машиностроение. – 1980. – 511 с.
14. Бусагов А.В., Сорокина Т.И. О снижении золотого износа конвективных поверхностей нагрева на Запорожской ГРЭС // Энергетик. – 1988. – № 10. – С. 21-22.