

Marek PRNOBIS
Politechnika Śląska, Gliwice

PRZEDSIĘWZIĘCIA EKSPLOATACYJNE DLA ZMNIEJSZENIA EROZJI KOTŁOWYCH PĘCZKÓW KONWEKCYJNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwości obniżenia intensywności erozji pęczków konwekcyjnych na drodze zmian w sposobie eksploatacji kotła. Podano zasady obliczeń pozwalających na ocenę skuteczności następujących przedsięwzięć: ograniczenia maksymalnej wydajności kotła, zmiany rodzaju paliwa oraz poprawy jakości przemiału.

OPERATIONAL MEASURES FOR THE REDUCTION OF EROSION IN CONVECTION BOILER SURFACES

Summary. The paper presents a method of calculation by which the efficiency of the reduction of fly ash erosion by means of changes in boiler operation can be evaluated. Following activities have been analysed: reduction of the boiler capacity, change of the type of coal and improvement of coal grinding quality.

BETRIEBSMÄßIGE METHODEN ZUR VERMINDERUNG DER HEIZFLÄCHENEROSION

Zusammenfassung. Die Arbeit stellt die betriebsmäßigen Maßnahmen zur Bekämpfung der rauchgasseitigen Heizflächenerosion dar. Folgende Unternehmen, deren rechnerische Abschätzung gezeigt wurde, sind analysiert worden: Begrenzung der maximalen Kesselwärmeleistung, Veränderung der Brennstoffsorte und Verbesserung der Kohlefeinheit.

1. WSTĘP

Intensywność erozji pęczków konwekcyjnych ma podstawowe znaczenie dla niezawodności kotła. W przypadku silnej erozji zachodzi konieczność jej ograniczenia, przy czym efekt ten można uzyskać zarówno drogą zmian konstrukcyjnych, jak i modyfikacji warunków eksploatacji kotła.

Pośród konstrukcyjnych metod zwalczania erozji najskuteczniejszą, ale i najdroższą jest przebudowa kanału spalin dla zwiększenia jego przekroju przepływowego. Stosowane są ponadto różne sposoby wyrównywania profilu prędkości spalin w pęczku, ponieważ lokalne wzrosty prędkości przepływu (np. w pobliżu ścian kanału) mogą powodować intensywną erozję rur.

W wielu przypadkach dla wymaganego ograniczenia erozji wystarczające jest wprowadzenie zmian w eksploatacji kotła, które są od modernizacji konstrukcyjnych znacznie tańsze. W grę wchodzi przy tym następujące przedsięwzięcia:

- ograniczenie maksymalnej wydajności kotła,
- zmiana rodzaju paliwa,
- regulacja separatorów młynowych dla poprawy jakości przemiału.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU EROZJI

Wielkość erozyjnego ubytku materiału rurowego [$\mu\text{m}/\text{h}$], zgodnie z badaniami [1, 3], można przedstawić w postaci zależności

$$\Delta h/\tau = 2,33 \cdot 10^{-7} w_o^3 \beta_w^3 e c_p \beta_c \beta_m \beta_2 \eta_p \quad (1)$$

gdzie:

- w_o – średnia prędkość spalin w pustym kanale na wlocie do pęczka, m/s,
- β_w – parametr charakteryzujący rozkład prędkości spalin w kanale kotła,
- e – wskaźnik erozyjności charakteryzujący własności erozyjne popiołu lotnego, $\mu\text{m}/\text{h}$,
- β_m – parametr charakteryzujący wpływ temperatury pracy stali na zużycie erozyjne rur,
- c_p – średnia koncentracja popiołu lotnego w spalinach, g/m^3 ,
- β_c – parametr charakteryzujący rozkład koncentracji popiołu lotnego w spalinach,
- β_2 – parametr charakteryzujący wpływ podziałki poprzecznej pęczka na zużycie erozyjne rur,
- η_p – średnie prawdopodobieństwo uderzenia cząstek popiołu w rurę.

Zależność (1) opisuje ubytek materiału rury w miejscu maksymalnej erozji, tzn. dla współrzędnej katowej $\varphi \cong 45^\circ$ licząc od tworzącej napływowej. Poszczególne składniki wzoru (1) określone są w sposób następujący:

$$w_0 = \frac{B V_{sp} T_{sp}}{273F} \quad (2)$$

gdzie:

- B – obliczeniowe zużycie paliwa przez kocioł, kg/s,
- V_{sp} – objętość spalin dla stosunku nadmiaru powietrza na wlocie do rozpatrywanego pęczka, m_n^3/kg_{pal} ,
- T_{sp} – bezwzględna temperatura spalin na wlocie do pęczka, K,
- F – powierzchnia przekroju poprzecznego kanału spalin przed pęczkiem, m^2 .

Parametr β_w określony jest wzorem

$$\beta_w = \frac{w_{0max}}{w_0} \quad (3)$$

gdzie:

- w_{0max} – maksymalna prędkość spalin w kanale kotła wynikająca z nierównomierności profilu prędkości spalin, m/s.

Z badań [2] wynika, że wartość β_w w pęczkach konwekcyjnych krajowych kotłów pyłowych zmienia się w granicach 1,09 do 1,25.

Parametr charakteryzujący rozkład koncentracji popiołu lotnego w spalinach β_c , definiuje zależność

$$\beta_c = \frac{c_{pmax}}{c_p} \quad (4)$$

gdzie:

- c_{pmax} – maksymalna lokalna koncentracja popiołu lotnego w spalinach wypełniających kanał kotła, g/m^3 .

Z badań [2] wynika, że wartość β_c w pęczkach konwekcyjnych krajowych kotłów pyłowych zmienia się w granicach 1,20 do 1,37.

Średnie prawdopodobieństwo trafienia rury przez cząstki polidispersyjnego popiołu opisuje wzór:

$$\eta_p = \frac{\sum \eta_{pi} (R_i - R_{i+1})}{100} \quad (5)$$

gdzie R_i – udział ziaren większych od d_{pi} , %

Prawdopodobieństwa składowe η_{pi} (dla ziaren z poszczególnych przedziałów granulacji) są funkcją liczb: Stokesa – Stk, Froude'a Fr oraz Reynoldsa: Re_{dp} dla ruchu pyłu i Re_D dla przepływu spalin w kanale. Poszczególne liczby kryterialne zdefiniowane są następująco:

$$Stk = \frac{d_p^2 \rho_p w_o}{18 v_{sp} \rho_{sp} D} \quad (6)$$

gdzie: ρ_p – gęstość pyłu, kg/m^3 ,
 ρ_{sp} – gęstość spalin, kg/m^3 ,
 v_{sp} – kinematyczny współczynnik lepkości spalin, m^2/s ,
 D – zewnętrzna średnica rury, m.

$$Fr = \frac{w_o^2}{gD} \quad (7)$$

gdzie g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ,

$$Re_{dp} = \frac{w_o d_p}{v_{sp}} \quad (8)$$

$$Re_p = \frac{w_o D}{v_{sp}} \quad (9)$$

Wzór opisujący η_{pi} ma postać

$$\eta_{pi} = \frac{1}{880 C_1^{-0,608} + 1} \quad (10)$$

gdzie

$$C_1 = (18 Stk)^{2,5} Re_D^{0,8} / (Fr Re_{dp}^{0,3}) \quad (11)$$

Wpływ podziałki poprzecznej $\sigma_1 = s_1/D$ na zużycie erozyjne rur określa zależność [4, 5]

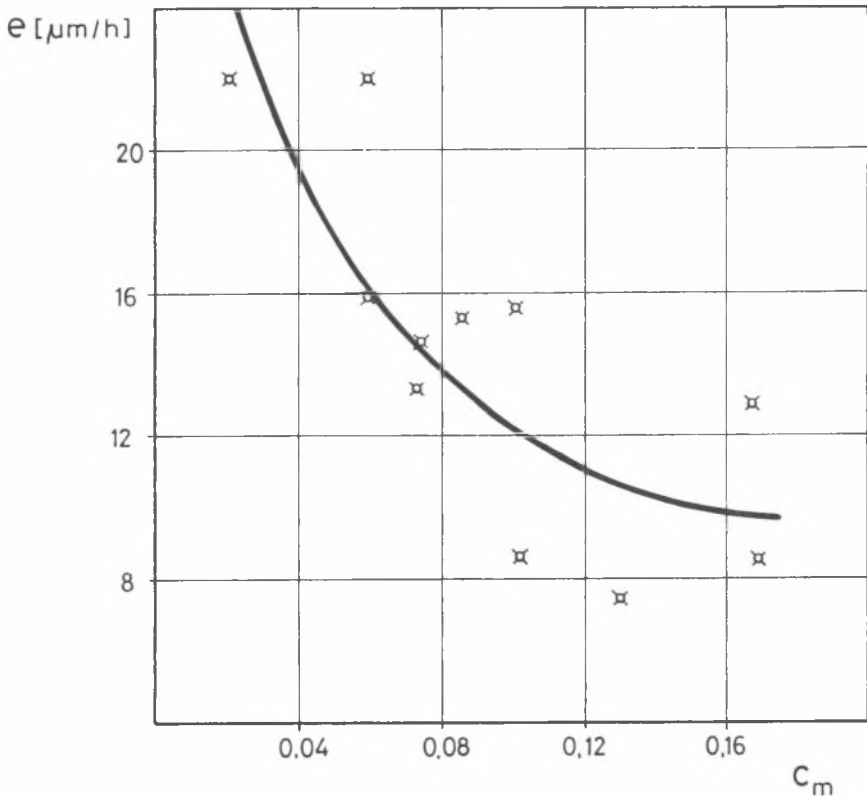
$$\beta_2 = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1 - 1} \right)^2 \quad (12)$$

Wskaźnik erozyjności popiołu e [$\mu\text{m}/\text{h}$] określany jest doświadczalnie i stanowi ubytek materiału w standardowych warunkach laboratoryjnych. Wyniki badań wskaźnika erozyjności przeprowadzone w [1] – rys. 1 pozwalają stwierdzić, że największy wpływ na wartość e ma skład chemiczny popiołu opisany wskaźnikiem c_m o postaci:

$$c_m = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2} \quad (13)$$

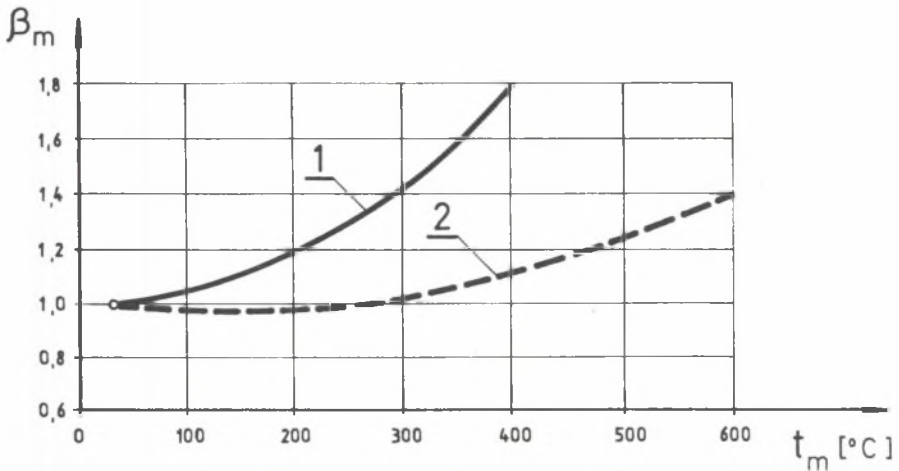
W związku z tym wyniki [1] opracowano metodą regresji jako funkcję

$$e = 4,78 c_m^{-0,421} \quad (14)$$



Rys. 1. Wpływ temperatury pracy stali na własności erozyjne

Fig. 1. The influence of the temperature on the erosive properties of the steel



Rys. 2. Zależność wskaźnika erozyjności od składu popiołu

Fig. 2. The influence of the chemical constitution of fly ash on the erosion coefficient

Wzór powyższy pozwala stwierdzić, jak zmieniają się własności erozyjne popiołu lotnego po zmianie jego składu chemicznego (np. wskutek wprowadzenia odsiarczania poprzez wdmuchiwanie kamienia wapiennego do komory paleniskowej). Widać wyraźnie, że wzrost udziału glinokrzemianów w popiele prowadzi do zwiększenia wartości wskaźnika erozyjności.

Parametrem charakteryzującym wpływ temperatury pracy stali na zużycie erozyjne rur jest wielkość β_m określana na podstawie wykresu rys. 2 [1].

3. WPŁYW ZMIAN OBCIĄŻENIA KOTŁA NA INTENSYWNOŚĆ EROZJI POPIOŁOWEJ

Zmiany obciążenia kotła są powodem zmian prędkości spalin, które w zasadniczy sposób determinują wielkość erozyjnego ubytku rur. Odnosząc chwilowe obciążenie (wydajność cieplną) Q do wartości nominalnej Q_1 odpowiadającej 100% wydajności kotła, uzyskuje się bezwymiarowy uporządkowany wykres obciążeń w funkcji rocznego czasu pracy $(Q/Q_1) = f(\tau)$.

Zakładając, że skład paliwa i stosunek nadmiaru powietrza w kotle nie zmienia się z obciążeniem, napisać można

$$w_o = \frac{B T_{sp}}{B_1 T_{sp1}} w_1 \quad (15)$$

gdzie indeks 1 odpowiada obciążeniu nominalnemu (100%).

Biorąc pod uwagę, że temperatury spalin wylotowych w zakresie obciążeń 70 – 100% praktycznie nie ulegają zmianie, można przyjąć, że strata wylotowa, a tym samym sprawność kotła, nie zmienia się w funkcji obciążenia. W związku z tym zużycie paliwa oraz ilość wywiązanych spalin (przy utrzymaniu tych samych nadmiarów powietrza w ciągu konwekcyjnym) są proporcjonalne do obciążenia. Tym samym

$$W_o = \frac{Q T_{sp}}{Q_1 T_{sp1}} w_1 \quad (16)$$

Występujący we wzorze (15) stosunek temperatur spalin jest funkcją obciążenia kotła. Oznaczając

$$X(\tau) = \frac{Q}{Q_1} \quad \text{oraz} \quad Y[X(\tau)] = \frac{T_{sp}}{T_{sp1}} \quad (17)$$

oraz wykorzystując zależność (1) można obliczyć odpowiadający chwilowemu obciążeniu ubytek erozyjny $d(\Delta h/\tau)$ jako

$$d(\Delta h/\tau) = K X^3 Y^3 w_1^3 dt \quad (18)$$

skąd roczny ubytek

$$\Delta h_r = w_1^3 K \int_0^{\tau_r} X^3 Y^3 dt \quad (19)$$

Odnosząc podaną wyżej wielkość do hipotetycznego ubytku Δh_{r1} , który wystąpiłby, gdyby kocioł pracował stale z nominalnym obciążeniem, określić można ubytek względny

$$(\Delta h_r/\Delta h_{r1}) = \frac{\int_0^{\tau_r} X^3 Y^3 dt}{\tau_r} \quad (20)$$

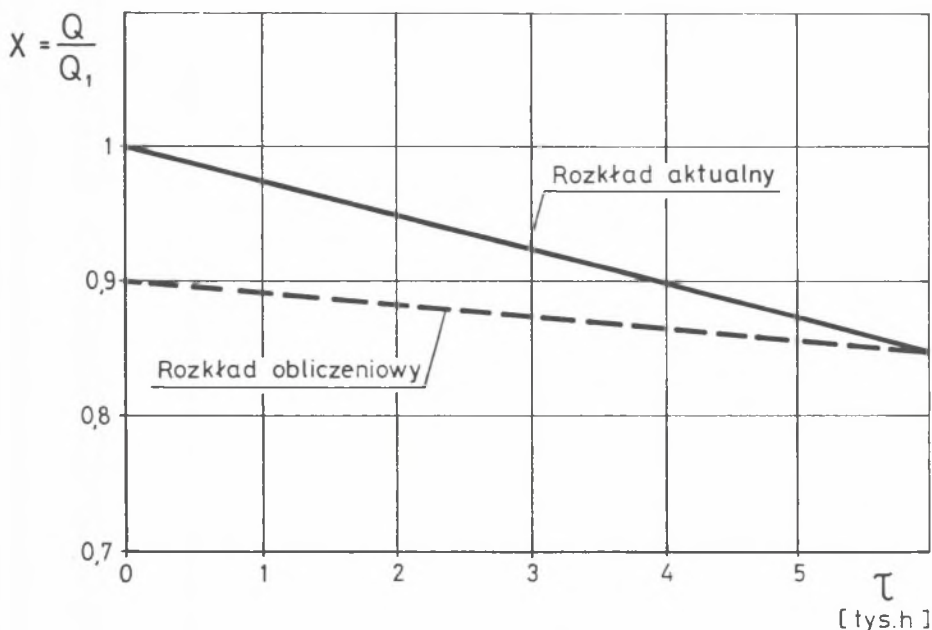
Występująca we wzorach (18) i (19) wielkość K jest iloczynem pozostałych składników wzoru (1) i ma postać

$$K = 2,33 \cdot 10^{-7} \beta_w^3 e c_p \beta_c \beta_m \beta_2 \eta_p \quad (21)$$

Spośród składników K jedynie β_m i η_p zależy w niewielkim stopniu od obciążenia kotła, jednak zarówno z wykresu rys. 2, jak i przeprowadzonych obliczeń wynika, że zmiany te przy założeniu, że zmiana maksymalnego obciążenia kotła nie przekroczy 20%, będą niewielkie, rzędu 1 – 3%. W związku z tym wielkość K w równaniu (21) można uznać za stałą.

Dla określenia intensywności erozji popiołowej podstawowe znaczenie ma roczny czas pracy kotła oraz rozkład obciążeń. Uzyskany na podstawie danych z eksploatacji kotła przybliżony uporządkowany wykres obciążeń dla stanu wyjściowego (aktualnego), z dokładnością wystarczającą do obliczeń technicznych, zaaprosymować można prostą – rys. 3 o postaci

$$X(\tau)_A = a\tau + b \quad (22)$$



Rys. 3. Uporządkowany roczny wykres obciążeń kotła

Fig. 3. Annual load distribution of the boiler

W wyniku pomiarów i obliczeń dla typowych kotłów stwierdzono, że zależność $Y = T/T_1 = f(X)$ jest również w przybliżeniu liniowa i można ją opisać funkcją

$$Y = cX + d \quad (23)$$

Po wprowadzeniu powyższych zależności do wzoru (20) uzyskuje się postać

$$(\Delta h_r / \Delta h_{r1}) = \frac{\int_0^{\tau_r} (a\tau + b)^3 [c(a\tau + b) + d]^3 d\tau}{\tau_r} \quad (24)$$

Analogiczne obliczenia przeprowadzić należy następnie dla założonego, również liniowego, rozkładu obciążeń – rys. 3 opisanego równaniem (24) o współczynnikach a' i b' .

W efekcie uzyskuje się wartości $\Delta h_r / \Delta h_{r1}$ dla porównywanych obciążeń. Odnosząc je do siebie, określić można, na ile zmaleje ubytek erozyjny rur po zmniejszeniu maksymalnej wydajności kotła z aktualnej na obliczeniową. W ten sposób metodą prób można dobrać taki rozkład obciążeń kotła, który zapewni utrzymanie erozyjnych ubytków materiału rur w założonych granicach.

4. WPŁYW RODZAJU PALIWA NA INTENSYWNOŚĆ EROZJI

W obliczeniach powyższych zakłada się, że w obu wariantach spalane jest takie samo paliwo. Jednak efektywnym sposobem ograniczenia erozji popiołowej może być również zmiana paliwa na zawierające mniej popiołu i posiadające większą wartość opałową. Poniżej przedstawiono sposób obliczania, jak zmienia się intensywność erozji po przejściu na lepsze paliwo.

Zakładając, że przed i po zmianie rodzaju spalanego paliwa rozkład obciążeń i temperatur spalin jest taki sam, tzn.

$$X = Q/Q_1 = \text{idem} \quad Y = T_{sp}/T_{sp1} = \text{idem}$$

otrzymujemy stosunek ubytków erozyjnych dla paliwa aktualnego (p_a) i nowego (p_n) jako:

$$\frac{\Delta h_{pn}}{\Delta h_{pa}} = \frac{K_{pn}}{K_{pa}} \left(\frac{w_{pn}}{w_{pa}} \right)^3 \quad (25)$$

Przyjmując ponadto, że charakter rozkładu prędkości (β_w) i koncentracji (β_c) oraz prawdopodobieństwo η_p nie ulega zmianie, uzyskuje się

$$\frac{\Delta h_{pn}}{\Delta h_{pa}} = \frac{e_{pn}}{e_{pa}} \frac{c_{pn}}{c_{pa}} \left(\frac{w_{pn}}{w_{pa}} \right)^3 \quad (26)$$

Zarówno skład popiołu, jak i jego ziarnistość, determinujące wartość wskaźnika erozyjności, są dla paliw krajowych zbliżone. Prowadzi to do uproszczenia wzoru (26) do postaci:

$$\frac{\Delta h_{pn}}{\Delta h_{pa}} = \frac{c_{pn}}{c_{pa}} \left(\frac{w_{pn}}{w_{pa}} \right)^3 \quad (27)$$

Koncentrację popiołu w spalinach opisuje zależność

$$c_p = \frac{8,5 A^r}{V_{sp}} \frac{273}{T_{sp}} \quad (28)$$

Zakładając, że po przejściu na nowe paliwo rozkład temperatur i stosunki nadmiarów powietrza w ciągu konwekcyjnym kotła nie ulegną zasadniczej zmianie, można napisać:

$$\frac{\Delta h_{pn}}{\Delta h_{pa}} = \left(\frac{B_{pn}}{B_{pa}} \right)^3 \left(\frac{V_{sppn}}{V_{sppa}} \right)^2 \frac{A_{pn}^r}{A_{pa}^r} \quad (29)$$

Podstawiając odpowiednie wartości liczbowe dla obu paliw uzyskuje się stosunek ($\Delta h_{pn}/\Delta h_{pa}$) określający, na ile przejście na lepsze paliwo zmniejszy zagrożenie erozyjne powierzchni konwekcyjnych kotłów.

Łączny efekt zmiany paliwa i charakteru obciążeń kotłów jest iloczynem

$$\frac{\Delta h_n}{\Delta h_a} = \frac{(\Delta h_r/\Delta h_{r1})_{on}}{(\Delta h_r/\Delta h_{r1})_{oa}} \frac{\Delta h_{pn}}{\Delta h_{pa}}$$

gdzie: indeks „on” odpowiada nowemu (obniżonemu) obciążeniu maksymalnemu kotła, „oa” maksymalnemu obciążeniu aktualnie występującemu w pracy kotła, „pn” i „pa” erozji przy spalaniu odpowiednio nowego i aktualnego gatunku węgla. Indeksy „a” i „n” odpowiadają sumarycznemu wpływowi zmiany obciążenia i rodzaju paliwa na erozyjny ubytek materiału rur.

5. MOŻLIWOŚCI OBNIŻENIA EROZJI POPIOŁOWEJ DROGĄ REGULACJI SEPARATORA MŁYNOWEGO

Większość krajowych kotłów opalanych węglem kamiennym wyposażona jest w młyny miazdzące, pierścieniowo-kulowe, zaopatrzone w separatory statyczne. Poprzez zmianę kąta ustawienia łopatek α w zmodernizowanej wersji tego separatora regulować można charakterystykę ziarnową pyłu węglowego doprowadzanego do palników, a tym samym również granulację popiołu lotnego. Zgodnie z pomiarami [6] zakres regulacji ziarnistości pyłu jest znaczny: zmiana kąta α z 25° na 45° dała obniżenie pozostałości sitowych z wartości $R_{0,09} = 41,8\%$ i $R_{0,20} = 10,5\%$ na $R_{0,09} = 10,8\%$ i $R_{0,20} = 0,2\%$. Zmiana taka okupiona jest jednak zmniejszeniem wydajności młyna z 10,8 na 8,4 t/h.

W przypadku istnienia rezerwy wydajności młyna można więc uzyskać zmniejszenie erozji powierzchni konwekcyjnych poprzez poprawę jakości przemiału, wskutek której maleje średnie prawdopodobieństwo η_p .

Zmiana charakterystyki przemiałowej w podanym zakresie pozostałości sitowych powoduje obniżenie $\eta_{p\acute{s}r}$ o ok. 30 – 40%. Zgodnie z wzorem (1) w analogiczny sposób maleje erozyjny ubytek rur. Poprawa jakości przemiału, którą w pewnym zakresie można uzyskać na drodze regulacji separatora, jest więc efektywnym sposobem obniżenia erozji rur.

6. WNIOSKI

1. Intensywność erozji popiołowej zależy w głównej mierze od rocznego czasu pracy oraz rozkładu obciążeń kotła.
2. Ograniczenie maksymalnego obciążenia kotła pozwala w znacznym stopniu zmniejszyć rozmiary erozji pęczków konwekcyjnych.
3. Skutecznym sposobem ograniczenia erozji jest zmiana paliwa na zawierające mniej popiołu (najlepiej o mniejszej zawartości glinokrzemianów) i posiadające większą wartość opałową.
4. Poprawa jakości przemiału, którą w pewnym zakresie można uzyskać na drodze regulacji separatora, jest efektywnym sposobem obniżenia erozji rur.

LITERATURA

- [1] Świrski J.: Badania erozji popiołowej i ocena zużycia rur kotłowych wskutek jej działania. Prace Instytutu Energetyki, Zeszyt 1, Warszawa 1975.

- [2] Świrski J.: Wytyczne projektowania kanałów spalinowych i powierzchni ogrzewalnych kotłów dla ochrony rur przed erozją popiołową. Opracowanie Instytutu Energetyki nr 10940, Warszawa 1974.
- [3] Fehndrich W.: Verschleißuntersuchungen an Kesselrohren. Mitteilungen der VGB 49 (1969), H.1, s. 58 – 70.
- [4] Urban B.: Vliv uspořadani trubek ve svazku vyhřevne plochy na jejich popilkovy oter. Energetika 1980 nr 3, s. 97 – 102.
- [5] Below S.J., Wasiliew A.A.: K metodikie rasczota abraziwnogo iznosa kotelnych powierzchnostiej nagriewa. Tieploenergietyka 1990 nr 4, s. 55 – 57.
- [6] Mroczek K.: Pomiary młyna EM-70 ze zmodernizowanym odsiewaczem i po zastosowaniu silnika z mniejszą prędkością obrotową w Elektrowni Łagisza. A.U.I. KOMOD, Gliwice 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan TALER

Wpłynęło do Redakcji 7.08.1994

Abstract

The paper presents a method of calculation by which the efficiency of the reduction of fly ash erosion by means of changes in boiler operation can be evaluated. Following activities have been analysed: reduction of the boiler capacity, change of the type of coal and improvement of coal grinding quality. The calculations have led us to the following conclusions:

1. The intensity of fly ash erosion depends strongly on the annual worktime and load distribution of the boiler.
2. The reduction of boiler maximum load keeps the flue gas velocities at an acceptable level and therefore minimizes the erosion.
3. Efficient method to decrease the erosion is the change of coal type to a coal with higher heating value and lower ash content.
4. Improvement of coal grinding quality, which is possible by means of control of the separator in the mill, is an efficient way of minimizing the erosion of the back-end convection surfaces.