

Henryk RUSINOWSKI, Edward KOSTOWSKI
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska
Zbigniew SZMAJDA
MPEC, Włocławek

BADANIE SPRAWNOŚCI ENERGETYCZNEJ KOTŁA Z ZASTOSOWANIEM METOD RACHUNKU WYRÓWNAWCZEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę wyznaczania sprawności energetycznej kotła z zastosowaniem rachunku wyrównawczego. Pozwala ona na szybką ocenę przebiegu procesu spalania w kotle i emisji szkodliwych gazów do otoczenia. Wykorzystuje się przy tym wyniki pomiarów eksploatacyjnych kotła.

APPLICATION OF THE LEAST SQUARES ADJUSTMENT TECHNIQUE FOR A DETERMINATION OF THE BOILER EFFICIENCY

Summary. The method of determining of the energy efficiency of the boiler with the coordination of mass balance has been presented. It permits to validate the combustion process taking place in the boiler as well as to estimate the emission of the pollutants to the environment. The experimental measurements of the boiler are utilized.

BESTIMMUNG DES THERMISCHEN KESSELWIRKUNGSGRADES MIT ANWENDUNG DER AUSGLEICHUNGSRECHNUNG

Zusammenfassung. Eine Methode der mittelbaren Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades des Dampferzeugers, mit Anwendung der Ausgleichsrechnung, wurde dargestellt. Diese Methode, welche auf Betriebsmessungen des DE basiert ermöglicht schnelle Abschätzung des Verbrennungsprozesses im DE und günstige Bestimmung der Emission von Schadstoffen.

1. WPROWADZENIE

Metody wyznaczania sprawności energetycznej kotła parowego określa polska norma PN-72/M-34128. Sprawność kotła można wyznaczyć metodą bezpośrednią lub pośrednią. W metodzie pośredniej sprawność energetyczną kotła wyznacza się z zależności:

$$\eta_{Ek} = 100\% - \sum_i S_i, \quad (1)$$

gdzie:

S_i – straty energii w kotle odniesione do energii doprowadzonej do kotła, w %.

Wyznaczenie względnych strat energii w kotle S_i wymaga znajomości jednostkowej ilości oraz składu spalin odpływających z kotła, pyłu unoszonego ze spalinami oraz zużła. Wielkości te norma zaleca wyznaczać z bilansu pierwiastka węgla oraz bilansu popiołu. Dodatkowo w celu wyznaczenia stopnia zawilżenia spalin wykorzystuje się równanie bilansu wodoru.

Pominięcie bilansów tlenu i azotu przy wyznaczaniu jednostkowych ilości produktów procesu spalania powoduje, że bilanse tych pierwiastków ze względu na występowanie nieuniknionych błędów pomiarowych nie spełniają się. Ponadto metoda wyznaczania sprawności energetycznej kotła zalecana przez normę nie pozwala na kontrolę założonej dokładności wyników pomiaru. W niniejszej pracy przedstawiono zastosowanie rachunku wyrównawczego do uzgodnienia bilansów substancji przy badaniu sprawności energetycznej kotłów wodnych i kotłów parowych.

2. ZASTOSOWANIE RACHUNKU WYRÓWNAWCZEGO DO UZGODNIENIA BILANSÓW SUBSTANCJI W KOTLE

Działanie każdego obiektu cieplnego jest kontrolowane za pomocą pomiarów. Na podstawie wyników pomiarów sporządza się bilanse substancji i energii. W technice cieplnej występuje najczęściej przypadek, że liczba wielkości niemierzonych (niewiadomych) jest mniejsza od liczby równań bilansowych – część równań bilansowych pozostaje nie wykorzystana. Przy badaniu sprawności energetycznej kotła metodą zalecaną przez PN są to równania bilansu tlenu i azotu. Nadmiarowe równania mogą być wykorzystane do obliczania poprawek do wielkości zmierzonych i wstępnie obliczonych niewiadomych. Procedura wyznaczania tych poprawek nazywa się uzgodnieniem bilansu substancji i energii [3].

Przeprowadzenie uzgadniania przy badaniach cieplnych kotłów daje następujące korzyści:

- a) uzyskuje się jednoznaczne i najbardziej prawdopodobne wartości ilości produktów procesu spalania oraz powietrza doprowadzanego do kotła,
- b) prawdopodobne błędy wyników pomiaru ulegają zmniejszeniu,
- c) uzyskuje się możliwość kontroli, czy założenia dokładności pomiarów zostaną dotrzymane.

W procesach spalania bilans substancji tworzą równania bilansu pierwiastków [4]. Można je zapisać w postaci ogólnej:

$$F_k(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta_1, \dots, \beta_u) = 0, \quad (2)$$

gdzie:

α_i – oznaczenie wielkości pomiarowej,

β_j – oznaczenie wielkości niemierzonej (niewiadomej).

Po podstawieniu wyników pomiaru l_i i przybliżonych wartości niewiadomych x_j uzyskuje się:

$$F_k(l_1, \dots, l_n, x_1, \dots, x_u) = -w_k, \quad k = 1, \dots, r. \quad (3)$$

Dla równań, z których wyznaczono przybliżone wartości niewiadomych, $w_k = 0$, a dla pozostałych równań bilansowych ze względu na występowanie nieuniknionych błędów pomiarowych $w_k \neq 0$. W celu uzyskania zgodności wszystkich równań bilansowych należy wprowadzić poprawki v_i wyników pomiaru oraz poprawki y_j przybliżonych wartości niewiadomych:

$$F_k(l_1 + v_1, \dots, l_n + v_n, x_1 + y_1, \dots, x_u + y_u) = 0.$$

Najbardziej prawdopodobne wartości poprawek odpowiadają maksimum funkcji wiarygodności [2]. W ogólnym przypadku n -wymiarowej przestrzeni błędów żądanie maksimum funkcji wiarygodności jest spełnione, jeżeli zachodzi warunek:

$$\sum_{i=1}^n m_i^{-2} v_i^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

gdzie m_i oznacza średni błąd bezwzględny i -tej wielkości mierzonej.

Poszukiwanie ekstremum warunkowego (4) poprzedza się zwykle linearyzacją równań więzów (2). Po rozwinięciu w szereg Taylora i pominięciu wyrazów o potęgach wyższej niż pierwsza uzyskuje się liniową postać równań bilansowych (więzów):

$$\sum_{i=1}^n a_{ki} v_i + \sum_{j=1}^u b_{kj} y_j = w_k, \quad k = 1, \dots, r \quad (5)$$

gdzie:

$$a_{ki} = \left(\frac{\partial F_k}{\partial \alpha_i} \right)_0, \quad b_{kj} = \left(\frac{\partial F_k}{\partial \beta_j} \right)_0$$

są pochodnymi cząstkowymi funkcji F_k według wielkości mierzonych α_i i według niewiadomych β_j w punkcie $(1_1, \dots, 1_n, x_1, \dots, x_u)$.

Zagadnienie ekstremum warunkowego (4) przy spełnieniu zlinearyzowanych równań więzów (5) rozwiązuje się metodą nieoznaczonych czynników Lagrange'a. Rozwiązanie w zapisie macierzowym ma postać:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{AV} + \mathbf{BY} &= \mathbf{W} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{V} &= \mathbf{A}^T\boldsymbol{\Lambda} \\ \mathbf{B}^T\boldsymbol{\Lambda} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

gdzie:

- \mathbf{A}, \mathbf{B} – macierze współczynników a_{ki} oraz b_{kj} ,
- $\mathbf{V}, \mathbf{Y}, \mathbf{W}$ – macierze kolumnowe v_i, y_j oraz w_k ,
- \mathbf{M} – macierz diagonalna wartości m_i^2 ,
- $\boldsymbol{\Lambda}$ – macierz kolumnowa współczynników Lagrange'a λ_k .

Rozwiązanie układu równań macierzowych (6) pozwala na wyznaczenie najbardziej wiarygodnych poprawek wielkości mierzonych v_i oraz poprawek niewiadomych y_j .

3. ALGORYTM OBLICZEŃ SPRAWNOŚCI ENERGETYCZNEJ KOTŁA

W metodzie pośredniej sprawność kotła wyznacza się z zależności (1). Względne straty energii odniesione do energii chemicznej paliwa doprowadzonego do kotła oblicza się ze wzorów:

a) strata wylotowa

- fizyczna

$$\frac{\dot{I}_{fsp}}{\dot{P}W_d} = \frac{n_{ss} \left[\sum_i [i] \Delta(Mi)_i \Big|_{t_{sp}}^{t_{ot}} + X_{zsp} \Delta(Mi)_{H_2O} \Big|_{t_{ot}}^{t_{sp}} \right]}{W_d} 100\%$$

- chemiczna

$$\frac{\dot{I}_{\text{chsp}}}{\dot{P}W_d} = \frac{n''_{\text{ss}}[\text{CO}](\text{MW}_d)_{\text{CO}}}{W_d} 100\%,$$

b) strata w pyłe unoszonym ze spalinami

- fizyczna

$$\frac{\dot{I}_{\text{fp}}}{\dot{P}W_d} = \frac{g_p \dot{i}_{\text{fp}}}{W_d} 100\%,$$

- chemiczna

$$\frac{\dot{I}_{\text{chp}}}{\dot{P}W_d} = \frac{g_p c_p W_{dC}}{W_d} 100\%,$$

c) strata w odprowadzanym żużlu

- fizyczna

$$\frac{\dot{I}_{\text{fz}}}{\dot{P}W_d} = \frac{g_z \dot{i}_{\text{fz}}}{W_d} 100\%,$$

- chemiczna

$$\frac{\dot{I}_{\text{chz}}}{\dot{P}W_d} = \frac{g_z c_z W_{dC}}{W_d} 100\%,$$

d) strata ciepła do otoczenia

$$\frac{\dot{Q}_{\text{ot}}}{\dot{P}W_d},$$

gdzie:

- \dot{P} , W_d – zużycie i wartość opałowia paliwa,
- n''_{ss} – jednostkowa ilość spalin suchych za podgrzewaczem powietrza,
- $[i]$, $X_{z\text{sp}}$ – udziały molowe składników spalin suchych za podgrzewaczem powietrza, $i = \text{CO}_2$; SO_2 ; CO ; O_2 ; N_2 oraz molowy stopień zawilżenia,
- g_p , g_z – jednostkowe ilości pyłu unoszonego ze spalinami i żużla odniesione do jednostki paliwa,

i_{fp}, i_{fz} – właściwa entalpia fizyczna pyłu unoszonego ze spalinami i żużla,

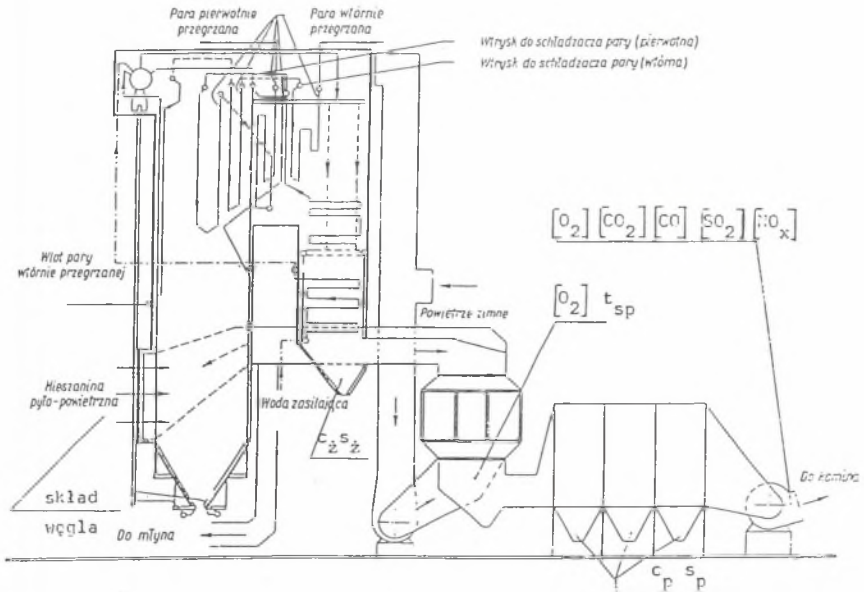
$W_{dC}, (MW_d)_{CO}$ – wartość opałowa pierwiastka węgla i tlenku węgla.

Względną stratę ciepła do otoczenia określa się na podstawie PN-72/M-34128.

4. ZASTOSOWANIE OPRACOWANEJ METODY DO WYZNACZANIA SPRAWNOŚCI ENERGETYCZNEJ KOTŁA PAROWEGO I WODNEGO

Przedstawioną w pracy metodę wykorzystano przy badaniach sprawności energetycznej kotła parowego OP-650 [7] oraz kotła wodnego WR-25 [5]. Dla kotła parowego (rys. 1) wyodrębniono dwie osłony bilansowe. Podstawowa osłona bilansowa obejmuje komorę kotła wraz z przegrzewaczem, podgrzewaczem wody i powietrza oraz część traktu spalinowego do miejsca pełnego pomiaru składu spalin w punkcie za elektrofiltrami. Dla tej osłony bilansowej sformułowano:

- równanie połączonego bilansu węgla i siarki,
- równanie bilansu „wolnego tlenu”,



Rys. 1. Schemat pomiarowy kotła parowego

Fig. 1. Schematic diagram of measuring installation for steam boiler

- równanie bilansu azotu,
- równanie bilansu popiołu,
- równanie bilansu żużla,
- równanie bilansu siarki.

Druga z osłon bilansowych obejmuje odcinek traktu spalinowego zawarty pomiędzy punktem za podgrzewaczem powietrza a miejscem pełnego pomiaru składu spalin. Dla tej osłony bilansowej sformułowano równanie bilansu tlenu.

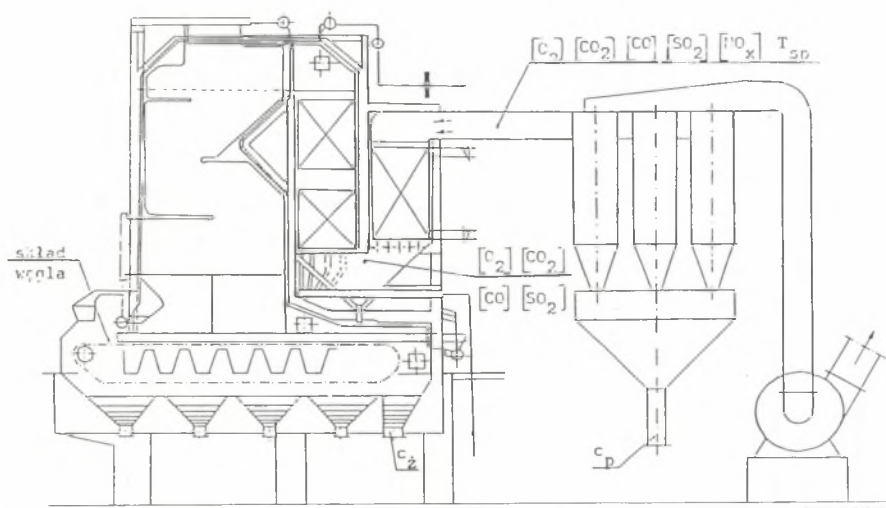
Dla kotła wodnego (rys. 2) również wyodrębniono dwie osłony bilansowe. Podstawowa osłona bilansowa obejmuje komorę spalania wraz z podgrzewaczem wody. Dla tej osłony bilansowej sformułowano:

- równanie połączonego bilansu węgla i siarki,
- równanie bilansu „wolnego tlenu”,
- równanie bilansu azotu,
- równanie bilansu popiołu.

Druga z osłon bilansowych obejmuje podgrzewacz powietrza. Dla tej osłony bilansowej sformułowano równania bilansu węgla i tlenu. Ponadto dla całego kotła sformułowano równanie bilansu wodoru.

W procedurze uzgadniania równania bilansu pierwiastków uzupełniają zależności na sumę udziałów.

Dane pomiarowe do obliczeń oraz wyniki obliczeń uzgadniania bilansów zamieszczono: dla kotła parowego w Załączniku 1, a dla kotła wodnego w Załączniku 2.



Rys. 2. Schemat pomiarowy kotła wodnego

Fig. 2. Schematic diagram of measuring installation for water boiler

Po uzgodnieniu bilansów wyznaczany jest skład i ilość spalin suchych za podgrzewaczem powietrza. Uzgodnione wyniki bilansu substancji pozwalają na obliczenie jednostkowych (w odniesieniu do jednostki energii chemicznej paliwa) strat energii oraz sprawności energetycznej kotła. Dodatkowo obliczane są stężenia CO, SO₂ i NO_x dla spalin odpływających z kotła oraz w przeliczeniu na spaliny odniesienia. Wyniki obliczeń zamieszczono w Załącznikach 3 i 4.

5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiona metoda wyznaczania sprawności energetycznej kotła i emisji CO, SO₂ oraz NO_x na podstawie rachunku wyrównawczego ma zastosowanie dla kotłów pyłowych i rusztowych. Wraz z opracowanym programem obliczeniowym stanowi bardzo użyteczne narzędzie dla kadry inżynierskiej ciepłowni, elektrociepłowni i elektrowni. Pozwala w warunkach ruchowych przy wykorzystaniu typowych pomiarów cieplnych kotła określić najważniejsze parametry i emisje szkodliwych gazów do otoczenia, a także na kontrolę poprawności przeprowadzonych pomiarów. Jest niezbędnym narzędziem do bieżącej oceny przebiegu procesu spalania w kotle.

LITERATURA

- [1] Hänsel H.: Podstawy rachunku błędów. WTN, Warszawa 1968.
- [2] Szargut J. (red.): Rachunek wyrównawczy w technice cieplnej. Ossolineum, Wrocław 1985.
- [3] Szargut J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej. WTN, Warszawa 1983.
- [4] Szargut J.: Termodynamika techniczna. PWN, Warszawa 1991.
- [5] Szmajda Z.: Analiza energetyczno-ekologiczna eksploatacji kotła wodnego WR-25 w MPEC Włocławek. Praca końcowa Studium Podyplomowego Audyting energetyczny w przemyśle, Gliwice 1994.
- [6] Norma PN-72/M-34128.
- [7] Sprawozdanie z pracy NB-135/RME-3/92 pt. Uproszczony bilans substancji i energii dla kotła z zastosowaniem rachunku wyrównawczego, ITC, Gliwice 1992.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan TALER

Wpłynęło do Redakcji 7.08.1994 r.

Abstract

Performance of the boiler can be verified making use some measurements. Taking these measurements into account mass balances as well as energy balance are formulated what allows the energy efficiency and emission to the environment of flue substances to be calculated.

When mass balances for the boiler are formulated the number of unknowns is usually less than the number of equations, i.e. some equations are not considered. Polish Norm suggests oxygen balance and nitrogen balance to be neglected. However, redundant equations may be used to determine corrections of measurement quantities as well as corrections of unknowns. The procedure to calculate these corrections is called least squares adjustment technique.

In this work the application of the adjustment technique for a boiler is presented. Balance equations are linearized and corrections of measurement quantities and unknowns are calculated from the condition of the maximum of reliability function. Results of calculations have been, after correction, used to determine energy efficiency, relative energy losses and emission to the environment of flue substances. Both water boiler and steam boiler have been analysed in this work.