

Zbigniew RATAJ

Instytut Kotłów,
Siłowni Ciepłych i Jądrowych

LINIOWY MODEL STATYKI PRZEPŁYWU CIEPŁA W KOMORZE PALENISKOWEJ KOTŁA

Streszczenie. Przedstawiono liniowy model statyki wymiany ciepła w komorze paleniskowej, który uwzględnia wpływ szeregu parametrów na wymianę ciepła w komorze. Przedstawione zależności można łatwo zastosować w modelu kompleksowym dynamiki kotła walczkowego lub przepływowego.

1. Wprowadzenie

W modelowaniu własności dynamicznych kotłów różnych systemów: walczkowych, z wymuszonym obiegiem i przepływowych [6], istotny problem stanowi poprawne odwzorowanie komory paleniskowej w modelu całego kotła.

Do komory paleniskowej doprowadzane są strumienia: paliwa, powietrza pierwotnego i wtórnego, powietrza zimnego (dossanego) i spalin recyrkulacyjnych, mających różne temperatury. Z komory paleniskowej odprowadza się strumień ciepła do powierzchni umieszczonych na ścianach oraz strumień ciepła w spalinach opuszczających komorę, posiadających pewną temperaturę.

Strumień ciepła można określić w zależności od wielkości wejściowych stosując mniejsze lub większe uproszczenia.

Podstawowym uproszczeniem jest pominięcie procesów akumulacji energii i masy podczas spalania i wymiany ciepła, czyli pominięcie dynamiki spalania i dynamiki przekazywania ciepła [2, 6, 7, 9].

Pominięcie dynamiki spalania jest uzasadnione tym, że stałe czasowe odpowiadające spalaniu pyłu węglowego (najniekorzystniejszy przypadek) nie przekraczają wielkości 0,1 do 1,2 s [1]. Czasy te są zbyt małe w stosunku do zmian wnoszonych przez inne elementy układu paleniskowego, takie choćby jak młyn [6], stąd ich pominięcie i przyjęcie jedynie współczynników wzmocnienia jest w pełni uzasadnione.

Zdaniem autora można pominąć dynamikę przekazywania ciepła w komorze paleniskowej [6], gdyż:

- uchyb wynikający z nieodwzorowania dynamiki spalania jest mniejszy niż wprowadzony przez niedokładności do chwili obecnej opis układu młyńskiego,

- procesy akumulacji ciepła w objętości spalin wypełniającej komorę paleniskową charakteryzują się bardzo małymi stałymi czasowymi^{x)}, pomijalnymi z uwagi na małą gęstość spalin.

W niektórych pracach uwzględniano własności dynamiczne [3,4,5]. Mimo to, dokładność uzyskiwanych rezultatów nie była wyższa niż w metodzie autora [6], z uwagi na przyjęcie szeregu uproszczonych zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi i wyjściowymi.

To, że można komorę paleniskową w modelu kotła traktować jako element statyczny, potwierdzają wyniki niektórych badań [7].

2. Struktura proponowanego modelu statyki komory

W kraju stosowana jest powszechnie w obliczeniach cieplnych kotłów metoda Gurwioza [8] mająca cechy uniwersalności i oparta jest na podstawach naukowych. W pracach [1,2,7,9] wykorzystano w modelowaniu algorytmu oparte o tę metodę; natomiast w pracy [5] stosowano metodę Wolenberga, która jest prostsza, ale mniej dokładna.

W metodzie Gurwioza [8] oblicza się temperaturę na wylocie z komory paleniskowej T_K'' przy pomocy zależności (1):

$$\frac{T_K''}{T_t} = \frac{B_0^{0,6}}{\bar{M} \cdot a_p^{0,6} + B_0^{0,6}} \quad (1)$$

gdzie:

B_0 - liczba kryterialna Boltzmana wyrażana przez:

$$B_0 = \frac{\dot{M}_{B \text{ obl}} \cdot V_s \cdot \sigma_s \cdot \dot{\epsilon}_r}{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \psi_{\dot{\epsilon}_r} \cdot F_{\dot{\epsilon}_c} \cdot T_t^3} \quad (2)$$

$\dot{M}_{B \text{ obl}}$ - strumień paliwa,

T_t - temperatura teoretyczna spalin,

a_p - stopień czerni komory paleniskowej,

$\psi_{\dot{\epsilon}_r}$ - średnia wartość współczynnika cieplnej efektywności ekranów

$V_s, \sigma_s \cdot \dot{\epsilon}_r$ - iloczyn objętości spalin i średniego ciepła właściwego,

$F_{\dot{\epsilon}_c}$ - powierzchnia ograniczająca komorę paleniskową.

^{x)} Stała czasowa akumulacji masy spalin wynosi 0,5 - 1,5s.

Stopień czerni paleniska a_p zależy od efektywnego stopnia czerni płomienia a_{pl} oraz średniego współczynnika cieplnej efektywności ekranów (3)

$$a_p = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \psi_{sr}} \quad (3)$$

Na wielkość przejmowanego strumienia ciepłego wywiera więc wpływ stopień czerni płomienia a_{pl} , który zależy od łącznego współczynnika osłabienia promieniowania ośrodkiem wypełniającym komorę paleniskową k , ciśnienie spalin p , i efektywnej grubości promieniującej warstwy s (1).

$$a_{pl} = 1 - \exp(-k \cdot p \cdot s) \quad (4)$$

W przypadku spalania paliwa stałego^x łączny współczynnik osłabienia promieniowania wyraża się następującą zależnością (5):

$$k = k_g \cdot r_u + k_p \cdot \mu + k_k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad 1/m.MPa \quad (5)$$

gdzie:

współczynnik osłabienia promieniowania gazami trójatomowymi CO_2 i H_2O k_g określa zależność (6)

$$k_g = \left(\frac{7,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{-\sqrt{10 \cdot p \cdot r_u \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot T_K^n) \quad (6)$$

współczynnik osłabienia promieniowania cząstkami popiołu określa zależność (7):

$$k_p = 55900 (T_K^n \cdot d_p)^{-0,666} \quad 1/m.MPa \quad (7)$$

ponadto:

$k_k = 1,0$; $\alpha_1 = 0,5$; $\alpha_2 = 0,1$ w przypadku węgla kamiennego,

$\mu = f(A^F)$ koncentracja popiołu w spalinach

$r_u = r_{H_2O} + r_{RO_2}$ udział gazów trójatomowych,

Parametr M w równaniu (1) wyraża się następującą zależnością od kąta pochylenia palników β :

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot \left[\frac{h}{H} + 0,05 + 0,005 \beta \cdot \text{sign } \beta \right] \quad (8)$$

^xW przypadku opalania kotła innym paliwem zależność (5) przyjmuje inną postać [8].

Jak widać, z równań (1), (4), (5), (6) zależności są nieliniowe i mają złożony wpływ na strumień przejmowanego ciepła do ekranów komory paleniskowej.

W pracy [1] zastosowano znaczne uproszczenie polegające na przyjęciu stałości stopnia szerni paleniska, wyrażając strumień w postaci (9)

$$\Delta Q_{ek_1} = F_1 \left[(B_0), \varepsilon = \varphi_1(B_0), T_t \right] \quad a_p = \text{const} \quad (9)$$

natomiast w pracy [7] ustalono zależność nieliniową na T_K^n oraz na Q_{ek} w funkcji strumienia spalin i współczynnika zachowania ciepła φ .

Modele powyższe nie uwzględniają wszystkich powiązań występujących w procesie przekazywania ciepła na drodze promieniowania. Stąd dla proponowanego modelu przyjęto następujące wielkości wejściowe:

- strumień pyłu węglowego M_B ,
- wartość opałowa paliwa Q_1^r ,
- strumień powietrza pierwotnego L_I ,
- temperatura powietrza pierwotnego ϑ_{LI}^0 ,
- strumień powietrza wtórnego L_{II} ,
- temperatura powietrza wtórnego ϑ_{LII}^0 ,
- strumień spalin recyrkulujących V_R ,
- temperatura spalin recyrkulujących ϑ_R^0 ,
- kąt pochylenia osi palnika do poziomu β .

Wielkościami wyjściowymi są:

- strumień ciepła przejęty przez ekrany komory paleniskowej Q_{ek} ,
- temperatura spalin na wylocie komory paleniskowej T_K^n .

Po uzupełnieniu równań (1-8) równaniami określającymi strumień ciepła doprowadzony w paliwie Q_{pal} , strumień ciepła doprowadzony w paliwie i powietrzu Q_d , objętość spalin V_s oraz strumień przekazywanego ciepła do ekranów Q_{ek} wyrażony równaniem (10)

$$Q_{ek} = \varphi \left[Q_d - c_s \cdot V_s (T_K^n - 273,15) \right] \quad (10)$$

przyjęto następujące postępowanie, wykorzystując liniowe równania (11-21) otrzymane przez linearyzację wyjściowych, przy uwzględnieniu wszystkich ich wzajemnych powiązań.

Równania te mają następującą postać:

$$\begin{aligned} \Delta T_t = & \left. \frac{\partial T_t}{\partial Q_{pal}} \right|_0 \cdot \Delta Q_{pal} + \left. \frac{\partial T_t}{\partial L_I} \right|_0 \cdot \Delta L_I + \left. \frac{\partial T_t}{\partial \vartheta_{LI}^0} \right|_0 \cdot \Delta \vartheta_{LI}^0 + \left. \frac{\partial T_t}{\partial L_{II}} \right|_0 \cdot \Delta L_{II} \\ & + \left. \frac{\partial T_t}{\partial \vartheta_{LII}^0} \right|_0 \cdot \Delta \vartheta_{LII}^0 + \left. \frac{\partial T_t}{\partial V_R} \right|_0 \cdot \Delta V_R + \left. \frac{\partial T_t}{\partial \vartheta_R^0} \right|_0 \cdot \Delta \vartheta_R^0 \quad (11) \end{aligned}$$

$$\Delta B_o = \left. \frac{\partial B_o}{\partial T_t} \right|_o \cdot \Delta T_t + \left. \frac{\partial B_o}{\partial V_s} \right|_o \cdot \left[\left. \frac{\partial V_s}{\partial L_I} \right|_o \cdot \Delta L_I + \left. \frac{\partial V_s}{\partial L_{II}} \right|_o \cdot \Delta L_{II} + \left. \frac{\partial V_s}{\partial V_R} \right|_o \cdot \Delta V_R \right] \quad (12)$$

$$\Delta T_K^* = \left. \frac{\partial T_K^*}{\partial B_o} \right|_o \cdot \Delta B_o + \left. \frac{\partial T_K^*}{\partial T_t} \right|_o \cdot \Delta T_t + \left. \frac{\partial T_K^*}{\partial M} \right|_o \cdot \Delta M + \left. \frac{\partial T_K^*}{\partial a_p} \right|_o \cdot \Delta a_p \quad (13)$$

$$\Delta Q_{pa1} = Q_1^* \cdot \Delta M_{B \text{ obl}} + M_{B \text{ obl}} \cdot \Delta Q_1^* \quad (14)$$

$$\Delta M = \left. \frac{\partial M}{\partial \beta} \right|_o \cdot \Delta \beta \quad (15)$$

$$\Delta a_p = \left. \frac{\partial a_p}{\partial a_{p2}} \right|_o \cdot \Delta a_{p2} \quad (16)$$

$$\Delta a_{p2} = \left. \frac{\partial a_{p2}}{\partial k} \right|_o \cdot \Delta k \quad (17)$$

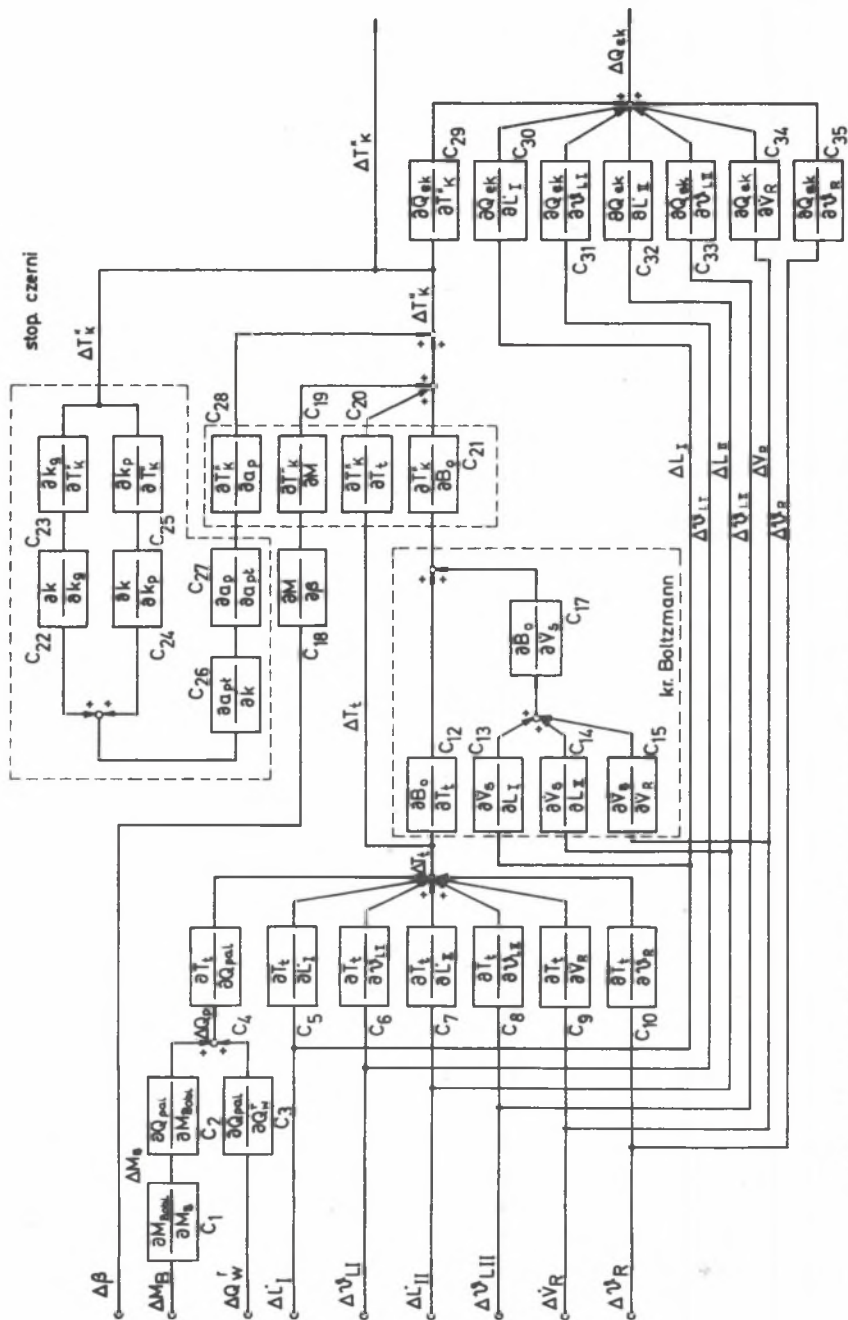
$$\Delta k = \left. \frac{\partial k}{\partial k_g} \right|_o \cdot \Delta k_g + \left. \frac{\partial k}{\partial k_p} \right|_o \cdot \Delta k_p \quad (18)$$

$$\Delta k_g = \left. \frac{\partial k_g}{\partial T_K^*} \right|_o \cdot \Delta T_K^* \quad (19)$$

$$\Delta k_p = \left. \frac{\partial k_p}{\partial T_K^*} \right|_o \cdot \Delta T_K^* \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{ek} = & \left. \frac{\partial Q_{ek}}{\partial Q_{pa1}} \right|_o \cdot \Delta Q_{pa1} + \left. \frac{\partial Q_{ek}}{\partial L_I} \right|_o \cdot \Delta L_I + \left. \frac{\partial Q_{ek}}{\partial L_{II}} \right|_o \cdot \Delta L_{II} + \\ & \left. \frac{\partial Q_{ek}}{\partial V_R} \right|_o \cdot \Delta V_R + \left. \frac{\partial Q_{ek}}{\partial T_K^*} \right|_o \cdot \Delta T_K^* + \\ & \left. \frac{\partial Q_{ek}}{\partial T_K^*} \right|_o \cdot \Delta T_K^* \end{aligned} \quad (21)$$

Dla przedstawienia wzajemnych oddziaływań pomiędzy poszczególnymi wielkościami wykonano schemat blokowy odpowiadający zespołowi równań (11-21), (rys. 1). Liniami przerywanymi zaznaczono zespół określający liczbę Belta i stopień czerni. Poszczególne bloki ponumerowano w ten sposób, że numer odpowiada numerowi współczynnika.



Rys. 1. Struktura modelu liniowego statyki komory paleniskowej kotła

W oparciu o schemat blokowy i zespół wszystkich równań dokonano przekształcenia modelu do następującej postaci końcowej (22) w formie równania wektorowo-macierzowego.

$$y_Q = G_{KO} \cdot U_{BL} \quad (22)$$

gdzie:

wektor wejścia

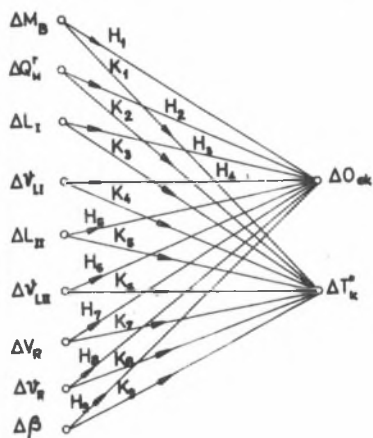
$$y_Q^T = \left| \Delta Q_{ek} \quad \Delta T_K'' \right| \quad (23)$$

wektor wyjścia

$$U_{BL}^T = \left| \Delta M_B \quad \Delta Q_1^r \quad \Delta L_I \quad \Delta v_{LI}^r \quad \Delta L_{II} \quad \Delta v_{LII}^r \quad \Delta V_R \quad \Delta v_R^r \quad \Delta \beta \right| \quad (24)$$

macierz modelu

$$G_{KO} = \begin{vmatrix} H_1 & H_2 & H_3 & H_4 & H_5 & H_6 & H_7 & H_8 & H_9 \\ K_1 & K_2 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 \end{vmatrix} \quad (25)$$



Rys. 2. Graf modelu statyki komory paleniskowej

Równaniu (22) odpowiada graf modelu (rys. 2). Współczynniki macierzy (25) wyrażone są następująco:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{F_1}{1-F_{10}}, & K_2 &= \frac{F_2}{1-F_{10}}, & K_3 &= \frac{F_3}{1-F_{10}}, \\ K_4 &= \frac{F_4}{1-F_{10}}, & K_5 &= \frac{F_5}{1-F_{10}}, & K_6 &= \frac{F_6}{1-F_{10}}, \\ K_7 &= \frac{F_7}{1-F_{10}}, & K_8 &= \frac{F_8}{1-F_{10}} \end{aligned} \quad (26)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} F_1 &= \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_4 \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20}) \\ F_2 &= \sigma_1 \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_4 \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20}) \\ F_3 &= \sigma_{17} \cdot \sigma_{21} + \sigma_5 \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20}) \\ F_4 &= \sigma_6 \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20}) \\ F_5 &= \sigma_{17} \cdot \sigma_{21} + \sigma_7 \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20}) \\ F_6 &= \sigma_8 \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20}) \end{aligned}$$

$$F_7 = \sigma_{17} \cdot \sigma_{21} + \sigma_9 \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20})$$

$$F_8 = \sigma_{10} \cdot (\sigma_{12} \cdot \sigma_{21} + \sigma_{20})$$

$$F_9 = \sigma_{18} \cdot \sigma_{19}$$

$$F_{10} = \sigma_{26} \cdot \sigma_{27} \cdot \sigma_{28} \cdot (\sigma_{22} \cdot \sigma_{23} + \sigma_{24} \cdot \sigma_{25})$$

$$H_1 = \varphi \frac{100 - S_3 - S_4}{100} \cdot \sigma_2 + K_1 \cdot H_{10}$$

$$H_2 = \varphi \frac{100 - S_3 - S_4}{100} \cdot \sigma_3 + K_2 \cdot H_{10}$$

$$H_3 = \varphi \left[\sigma_{LI} (\sigma_{LI}^n - 273,15) - \sigma_s (T_K^n - 273,15) \right] + K_3 \cdot H_{10}$$

$$H_4 = \varphi \cdot L_I \cdot \sigma_{LI} + K_4 \cdot H_{10}$$

$$H_5 = \varphi \cdot \left[\sigma_{LII} (\sigma_{LII}^n - 273,15) - \sigma_s (T_K^n - 273,15) \right] + K_5 \cdot H_{10}$$

$$H_6 = \varphi \cdot L_{II} \cdot \sigma_{LII} + K_6 \cdot H_{10}$$

$$H_7 = \varphi \cdot \left[\sigma_R (\sigma_R^n - 273,15) - \sigma_s (T_K^n - 273,15) \right] + K_7 \cdot H_{10}$$

$$H_8 = \varphi \cdot V_R \cdot \sigma_R + K_8 \cdot H_{10}$$

$$H_9 = K_9 \cdot H_{10}$$

$$H_{10} = -\varphi \cdot \sigma_s \cdot V_s.$$

Wartości współczynników ($\sigma_1 - \sigma_{28}$) oblicza się znajdując pochodną oznaczone na schemacie blokowym rys. 1. Dla ograniczenia objętości pracy pominięto definicje współczynników^{x)}.

Przedstawiona struktura modelu uwzględnia wzajemne powiązania pomiędzy temperaturą spalin, stopniem szerni oraz zmiennymi wielkościami wejściowymi.

Z przeprowadzonej analizy wpływu różnych parametrów na wielkości strumienia ciepła wynika, że przy zmianach wielkości o 15%, błąd w odwzorowaniu nie przekracza 1,8%. Przy zmianach o 30% dokładność odwzorowania wynosi 5,2%.

3. Podsumowanie

Przedstawiony model liniowy statyki komory paleniskowej odznacza się zwiększoną dokładnością w stosunku do innych modeli. Wynika to z uwzględ-

^{x)} Pełny wykaz wyrażek na współczynniki podano w pracy [6].

nienie szeregu związków określających zjawisko przekazywania ciepła na drodze promieniowania w komorze paleniskowej kotła. Pomimo zwiększającego się obecnie udziału modeli nieliniowych, zapewni on swą wyższość przez to, że można go wykorzystywać do badania i symulowania wpływu takich parametrów, jak: zmiany strumienia paliwa, wartości opałowej, ilości i temperatur powietrza, ilości i temperatur spalin reocyklujących i kąta pochylenia palników na zmiany strumienia spalin, strumienia ciepła, zmian temperatury spalin.

W zależności od potrzeb można niektóre współczynniki (elementy macierzy) pomijać lub przyjmować równe zero.

LITERATURA

1. Chorowski B., Piksa A.: Opracowanie teoretyczne z podaniem jedmliłych metod obliczeń dynamiki kotłów. Politechnika Wroclawska, 1968, cz. I.
2. Duda M.: Parametryczny model matematyczny dynamiki kotła walczakowego do badań przy dużych zmianach obciążenia. Pol. Warszawska 1974. Praca doktorska.
3. Kwan H.W., Anderson J.M.: A mathematical model of a 200 MW boiler. Inst. J. Control 1970, vol. 12 nr 6.
4. Profos P.: Die Regelung von Dampfanlagen. Springer Verlag, Berlin 1962.
5. Rakowski J., Wąglowski S., Duda M.: Model matematyczny kotła OP-230. Opracowanie Instytutu Energetyki nr 5004. Warszawa 1965.
6. Rataj Z.: Deterministyczny model matematyczny dynamiki kotła przepływowego z reocykulacją w parowniku. Politechnika Śląska 1979. Praca doktorska.
7. Strzelczyk F.: Uogólniony model matematyczny kotła walczakowego jako obiektu regulacji ciśnienia i temperatury pary. Zeszyty Naukowe Pol. Łódzkiej. Praca habilitacyjna. Łódź 1978.
8. Тепловој расѳет котельных агрегатов. Normativnyj Metod. Moskwa. Energija 1973.
9. Wąglowski S.: Dobroć regulacji ciśnienia i temperatury pary w blokach energetycznych w aspekcie jakości regulacji w układach wielowymiarowych. Politechnika Śląska, 1974. Praca doktorska.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Ludwik Cwynar

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1984 r.

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СТАТИКИ ПРОТЕКАНИЯ ТЕПЛА
В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ КОТЛА

Р е з ю м е

В работе описывается линейная модель статики обмена тепла в камере сгорания. Модель учитывает влияние ряда параметров на обмен тепла в камере. Показанные зависимости можно легко применить в комплексной модели динамики цилиндрического либо проточного котла.

A LINEAR MODEL OF HEAT TRANSFER IN FURNACE CHAMBER OF A BOILER

S u m m a r y

A linear model of static relations showing some cross-couplings between factors determining heat exchange in a combustion chamber of boiler was presented. The model having a simple form was based on the Gurwitsch' boiler calculation method, and can be used in modelling dynamics of a drum as well as once-through boilers.