

WOJCIECH CHOLEWA
Wydział Mechaniczno-Energetyczny

OPTIMALIZACJA WIELKOŚCI REKUPERATORA
I KOTŁA BEZPALENISKOWEGO
DLA PIECA HUTNICZEGO*)

Streszczenie. W pracy przedstawiono przybliżoną metodę wyznaczania ekonomicznie uzasadnionej wielkości zespołu rekuperatora i kotła bezpaleniskowego dla pieca hutniczego. Przy pewnych założeniach upraszczających wyprowadzono wzory określające nakłady inwestycyjne i oszczędności eksploatacyjne dla rozpatrywanego zespołu. Podano liczbowy przykład rozwiązania.

1. Wstęp

Głównym celem inwestycji usprawniającej gospodarkę energetyczną jest zmniejszenie kosztu energii zasilającej, równocześnie może zwiększyć się wydajność procesu, zmniejszyć zużycie surowców oraz można wyeliminować konieczność wytwarzania dodatkowego efektu użytecznego (np. pary) w urządzeniach nowo zbudowanych.

Przy usprawnianiu gospodarki energetycznej w hutnictwie duże znaczenie praktyczne ma zespół rekuperatora i kotła bezpaleniskowego zainstalowany za piecem grzejnym.

*) Praca uzyskała I nagrodę w Konkursie VII Sesji Studenckich Kół Naukowych Politechniki Śląskiej na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym.

Autor rozpatruje piec wglębny współpracujący z przeciwprądowym rekuperatorem i kotłem bezpaleniskowym składającym się z podgrzewacza wody i parowacza, przy założeniu stałej wydajności pieca i stałej temperatury spalin odpływających z komory grzejnej. Do istotnych założeń upraszczających należy także przyjęcie stałej średniej pojemności cieplnej spalin i powietrza oraz przyjęcie stałego stosunku nadmiaru powietrza.

Należy zaznaczyć, że w wyniku przyjętych założeń, podane dalej rozwiązanie jest w pewnym stopniu rozwiązaniem przybliżonym. Pozwala ono jednak oszacować orientacyjnie optymalną wielkość powierzchni rekuperatora i kotła.

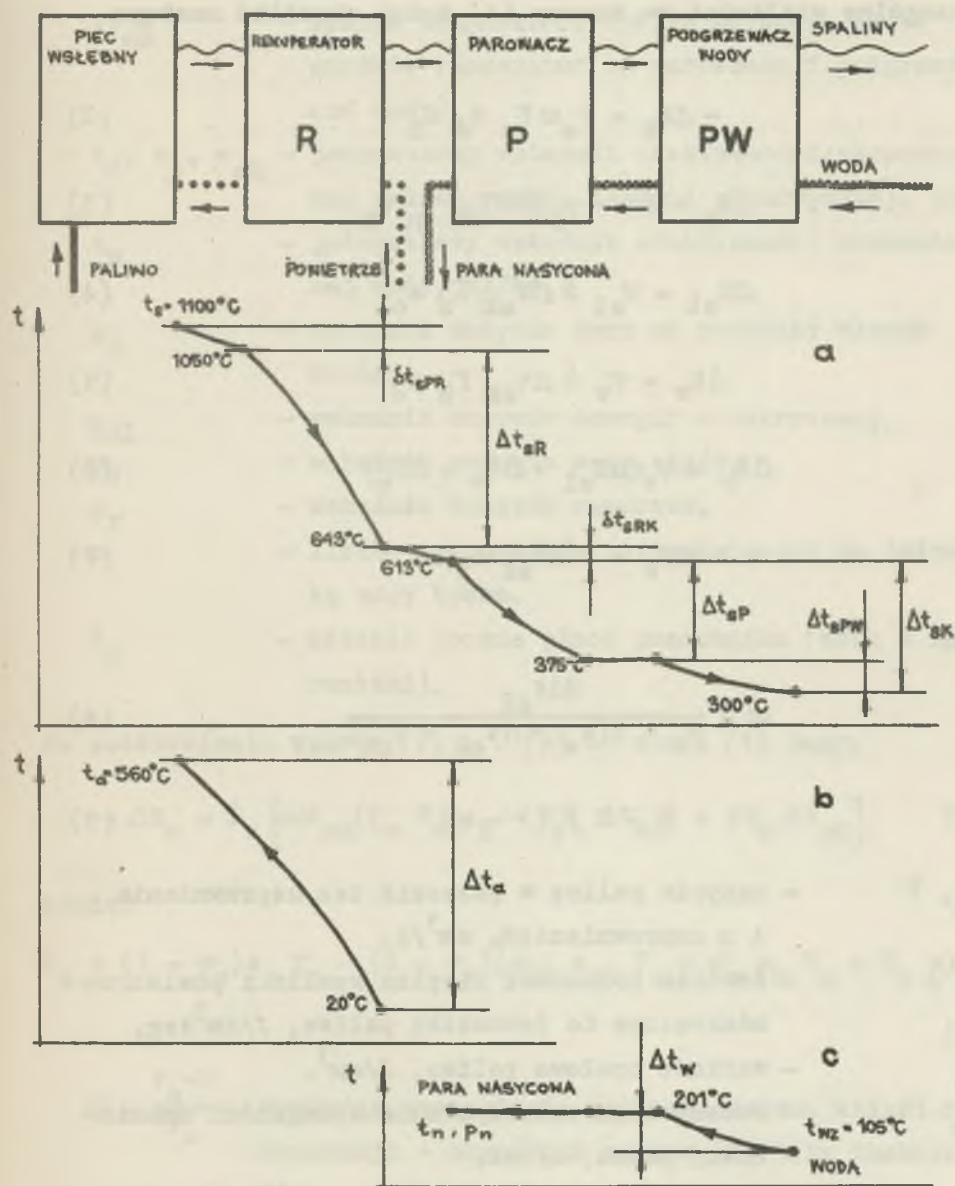
2. Roczne koszty eksploatacji

Zmniejszenie rocznych kosztów eksploatacji $-\Delta K_e$ uzyskane dzięki realizacji usprawnienia, czyli różnica pomiędzy kosztami eksploatacji pieca hutniczego przed zainstalowaniem rekuperatora i kosztami eksploatacji zespołu złożonego z pieca, rekuperatora i kotła bezpaleniskowego, wynosi:

$$-\Delta K_e = -\Delta K_E - \Delta K_p - (\Delta K_{el} + \Delta K_w + \Delta K_r + \Delta K_o) \quad (1)$$

gdzie:

- ΔK_E - roczne oszczędności kosztów paliwa, zł/rok,
- ΔK_p - roczny zysk spowodowany produkcją pary, zł/rok,
- ΔK_{el} , ΔK_w , ΔK_r , ΔK_o - roczny koszt energii elektrycznej (doprowadzonej np. do pomp), roczny koszt wody zasilającej kocioł, roczny koszt remontów oraz roczne koszty osobowe, zł/rok.



Rys. 1. Graficzna metoda rozwiązania układu równań (22)

Poszczególne wielkości we wzorze (1) można określić następująco:

$$-\Delta K_E = \dot{P}_0 \omega \tau_n w_d e_E \quad (2)$$

$$-\Delta K_p = (1 - \varphi_p) \dot{S} \Delta t_{sK} \tau_n e_p \quad (3)$$

$$\Delta K_{el} = \varphi_{el} \dot{S} \Delta t_{sK} \tau_n e_{el} \quad (4)$$

$$\Delta K_w = \varphi_w \dot{S} \Delta t_{sK} \tau_n e_w \quad (5)$$

$$\Delta K_r = \varphi_r (\Delta K_{el} + \Delta K_w + \Delta K_o) \quad (6)$$

$$\Delta K_o = \dot{S} \Delta t_{sK} K_p n \quad (7)$$

gdzie:

$$\omega = \frac{S \Delta t_{sR}}{w_d - S(t_s - \Delta t_{sR} - t_{ot})} \quad (8)$$

$$\dot{S} = S \dot{P}_0 (1 - \omega) \quad (9)$$

- \dot{P}_0, \dot{P} - zużycie paliwa w procesie bez usprawnienia i z usprawnieniem, um^3/s ,
- S, A - średnia pojemność cieplna spalin i powietrza odniesione do jednostki paliwa, $J/um^3 deg$,
- w_d - wartość opałowa paliwa, J/um^3 ,
- τ_n - roczny czas wykorzystania wydajności znamionowej pieca, s/rok ,
- t_s - temperatura spalin odpływających z komory grzejnej pieca,
- t_{ot} - temperatura otoczenia,
- Δt_{sR} - spadek temperatury na rekuperatorze,

- Δt_{sR} - spadek temperatury spalin na kotle (suma spadków temperatur na parowaczu i podgrzewaczu wody),
- e_E, e_p, e_{el} - jednostkowy wskaźnik efektywności ekonomicznej paliwa, pary, energii elektrycznej, zł/J,
- e_w - jednostkowy wskaźnik efektywności ekonomicznej wody, zł/kg,
- φ_p - wskaźnik zużycia pary na potrzeby własne kotła,
- φ_{el} - wskaźnik zużycia energii elektrycznej,
- φ_w - wskaźnik zużycia wody, kg/J,
- φ_r - wskaźnik kosztów remontów,
- n - liczba pracowników przypadających na jednostkę mocy kotła,
- K_p - średnia roczna płaca pracownika (wraz z narzutami).

Po podstawieniu wzorów (2) ... (9) do wzoru (1) mamy:

$$-\Delta K_e = \dot{P}_o \left[\omega \Delta t_{sR} (\tau_n W_d e_E - S V_k \Delta t_{sK}) + S V_k \Delta t_{sK} \right] \quad (10)$$

gdzie:

$$V_k = (1 - \varphi_p) e_p \tau_n - (1 + \varphi_r) (\varphi_{el} e_{el} \tau_n + \varphi_w e_w \tau_n + K_p n) \quad (11)$$

$\omega = \frac{P_o - P}{P_o}$ - względna oszczędność paliwa uzyskana dzięki rekuperacji - określona wzorem (8) jako funkcja Δt_{sR} .

3. Nakład inwestycyjny

Nakład inwestycyjny związany z usprawnieniem można wyrazić wzorem:

$$I = I_0 + j_R W_R + j_p W_p + j_{pw} W_{pw} \quad (12)$$

gdzie:

I_0 - jakowy nakład inwestycyjny niezależny od zakresu inwestycji, zł,

j_R, j_p, j_{pw} - jednostkowy przyrost względny nakładu inwestycyjnego powierzchni rekuperatora, parowacza, podgrzewacza wody, zł/m²,

W_R, W_p, W_{pw} - powierzchnia rekuperatora, parowacza i podgrzewacza wody, m².

W wyniku przeprowadzenia bilansu energetycznego rozpatrywanego układu przy podanych na wstępie założeniach i przy oznaczeniach jak na rys. 1, mamy:

$$W_R = \frac{\dot{S}}{k_R} \frac{A}{A - S} \ln \frac{t_s - \delta t_{sPR} - t_{ot} - \Delta t_{sR}}{t_s - \delta t_{sPR} - t_{ot} - \frac{S}{A} \Delta t_{sR}} \quad (13)$$

$$W_p = \frac{\dot{S}}{k_p} \ln \frac{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR}}{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR} - \xi \Delta t_{sK}} \quad (14)$$

$$W_{pw} = \frac{\dot{S}}{k_{pw}} \frac{\Delta t_{sK}}{\Delta t_{sK} - \frac{\Delta t_w}{1-\xi}} \ln \frac{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR} - \xi \Delta t_{sK}}{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR} - \Delta t_{sK}} \quad (15)$$

gdzie:

k - współczynnik przenikania ciepła, W/m²deg

$$\xi = \frac{r}{i'' - i_{wz}} \quad \Bigg| \quad \text{dla } p_n \quad (16)$$

δt_{sPR} - spadek temperatury spalin, spowodowany stratami w kanale pomiędzy piecem i rekuperatorem,

δt_{sRK} - spadek temperatury spalin, spowodowany stratami w kanale pomiędzy rekuperatorem i parowaczem.

Podstawiając wzory (8), (9), (13), (14), (15) do wzoru (12) otrzymujemy ostatecznie:

$$I = I_0 + P_0 S \frac{W_d - S(t_s - t_{ot})}{W_d - S(t_s - t_{ot} - \Delta t_{sR})} \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{j_R}{k_R} \frac{A}{A - S} \ln \frac{t_s - \delta t_{sPR} - t_{ot} - \Delta t_{sR}}{t_s - \delta t_{sPR} - t_{ot} - \frac{S}{A} \Delta t_{sR}} + \right.$$

$$+ \frac{j_p}{k_p} \ln \frac{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR}}{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR} - \xi \Delta t_{sK}} +$$

$$\left. + \frac{j_{pw}}{k_{pw}} \frac{\Delta t_{sK}}{\Delta t_{sK} - \frac{\Delta t_w}{1-\xi}} \ln \frac{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR} - \xi \Delta t_{sK}}{t_s - \delta t_{sPR} - \delta t_{sRK} - t_n - \Delta t_{sR} - \Delta t_{sK}} \right] \quad (17)$$

4. Metoda optymalizacji

Celem optymalizacji (zgodnie z [1]) jest taki dobór powierzchni rekuperatora i kotła lub co na jedno wychodzi spadku temperatury na nich, aby:

$$I \frac{bz}{T_{gr}} + \Delta K_e \rightarrow \text{MINIMUM} \quad (18)$$

$$I = [zk], \quad K_e = \left[\frac{zk}{rok} \right], \quad \frac{bz}{T_{gr}} = \left[\frac{1}{rok} \right]$$

gdzie:

- T_{gr} - jest granicznym czasem zwrotu (dla warunków polskich należy przyjmować $T_{gr} = 6$ lat),
 b - współczynnik korygujący, wyrażający wpływ długości okresu eksploatacji na efektywność rozpatrywanego wariantu inwestycyjnego (wartości b podano tabelarycznie w [1]),
 z - uwzględnia zamrożenie nakładu inwestycyjnego:

$$z = 1 + n_z q_z \quad (19)$$

- n_z - okres zamrożenia nakładów inwestycyjnych w czasie budowy,
 q_z - współczynnik zamrożenia, który należy dla warunków polskich, wg [1], przyjmować w wysokości $q_z = 0,16$.

Należy zaznaczyć, że autor rozpatruje przypadek najprostszy, w którym optymalizowane wielkości nie posiadają żadnych ograniczeń.

W rozpatrywanym przypadku:

$$I = I(\Delta t_{sR}, \Delta t_{sK}), \quad \Delta K_e = \Delta K_e(\Delta t_{sR}, \Delta t_{sK}) \quad (20)$$

Wprowadzając (wg [3]) cząstkowe czasy zwrotu nakładów inwestycyjnych \bar{T}_R, \bar{T}_K :

$$\bar{T}_R = b z \frac{\frac{\partial I}{\partial \Delta t_{sR}}}{\frac{\partial \Delta K_e}{\partial \Delta t_{sR}}}, \quad \bar{T}_K = b z \frac{\frac{\partial I}{\partial \Delta t_{sK}}}{\frac{\partial \Delta K_e}{\partial \Delta t_{sK}}} \quad (21)$$

otrzymujemy dwa warunki będące podstawą do obliczenia optymalnych wartości Δt_{sR} i Δt_{sK} na podstawie warunku (18):

$$\bar{T}_R = T_{gr}, \quad \bar{T}_K = T_{gr} \quad (22)$$

Korzystając z (8), (10), (11), (17), (21), (22) możemy metodą numeryczno-graficzną rozwiązać układ równań (22) w przypadku szczególnym (czyli dla określonych wszystkich parametrów stałych). Metoda ta przedstawiona jest w przykładzie obliczeniowym. Jako rozwiązanie układu równań (22) otrzymamy wartości $\Delta t_{sR_{OPT}}$ i $\Delta t_{sK_{OPT}}$, co pozwoli z kolei obliczyć wartości $W_{R_{OPT}}$, $W_{P_{OPT}}$ i $W_{PW_{OPT}}$ na podstawie wzorów (13), (14) i (15).

5. Przykład obliczeń

Dla układu jak na rys. 1 przyjęto następujące wielkości:

$$t_s = 1100^\circ\text{C}, \quad \delta t_{sPR} = 50 \text{ deg}, \quad \delta t_{sRK} = 30 \text{ deg}, \quad t_{ot} = 20^\circ\text{C}$$

$t_{wz} = 105^\circ\text{C}$, $p_n = 16 \text{ bar}$ ($t_n = 201,36^\circ\text{C}$), zakładając paliwo o składzie:

$\text{CO}_2 - 7\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 1,4\%$, $\text{O}_2 - 0,6\%$, $\text{H}_2 = 23,2\%$, $\text{CH}_4 - 11,6\%$,
 $\text{N}_2 - 34,9\%$, $\text{CO} - 22,3\%$, mamy dla średniej temperatury spalin 700°C i średniej temperatury powietrza 300°C :

$$W_d = 223000 \text{ kJ/kmol}, \quad S = 131,1 \text{ kJ/(kmol deg)}$$

$$A = 98,8 \text{ kJ/(kmol deg)}, \quad (\text{gdy } \lambda = 1,1)$$

Ponadto dla rekuperatora igłowego można przyjąć:

$$\begin{aligned} k_R &= 38,6 \text{ W/(m}^2 \text{ deg)}, & j_R &= 14 \text{ 000 zł/m}^2, \\ k_p &= 56,0 \text{ W/(m}^2 \text{ deg)}, & j_p &= 14 \text{ 000 zł/m}^2, \\ k_{pw} &= 40,0 \text{ W/(m}^2 \text{ deg)}, & j_{pw} &= 10 \text{ 000 zł/m}^2, \end{aligned}$$

oraz:

$$\begin{aligned} \varphi_p &= 0,06, \quad \varphi_r = 0,4, \quad \varphi_{el} = 0,035, \quad \varphi_w = 136 \text{ kg/GJ}, \quad e_E = \\ &= 23,1 \text{ zł/GJ}, \quad e_p = 29,8 \text{ zł/GJ}, \quad e_{el} = 194 \text{ zł/GJ}, \quad e_w = 0,01 \\ &\text{zł/kg}, \quad \tau_n = 7 \text{ 200 h/rok}, \quad K_p = 40 \text{ 000 zł/(prac. rok)}, \\ n &= 1,96 \text{ pracownika/MW} \quad P_o = 50 \text{ kmol/h}. \end{aligned}$$

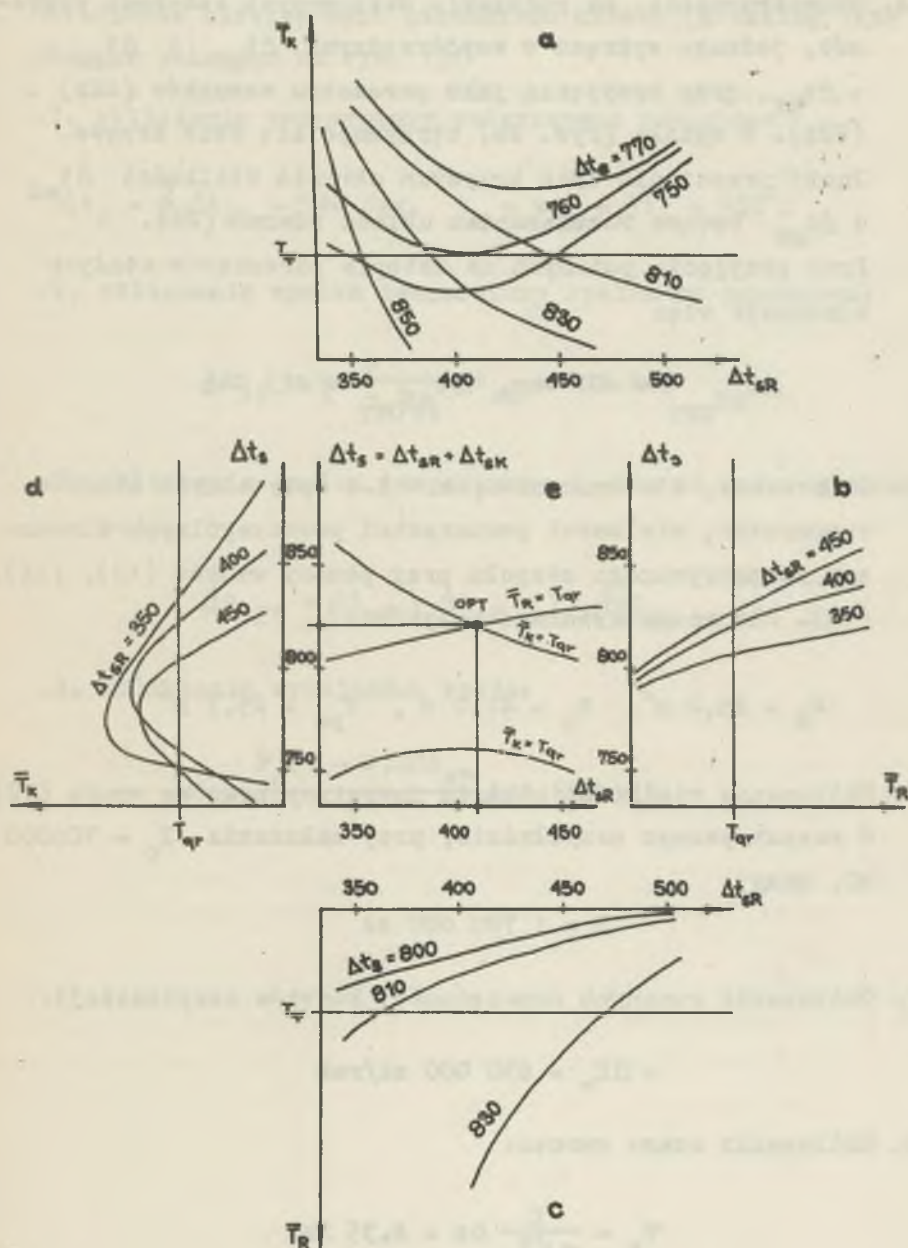
Przyjęte wartości są w zasadzie dowolne i w związku z tym otrzymanych wyników nie można uogólniać.

Tok przeprowadzania obliczeń:

- 5.1. Przyjęcie stałych parametrów układu (określenie liczbowe ich wielkości).
- 5.2. Obliczenie przy pomocy wzorów (21), (17), (10), (11) wartości \bar{T}_R i \bar{T}_K dla kilku przyjętych wartości Δt_{sR} i Δt_{sK} .
- 5.3. Wyznaczenie metodą interpolacji graficznej (rys. 2a, b, c, d) współrzędnych tych punktów, które spełniają jeden z następujących warunków:

$$\bar{T}_R = T_{gr} = 6 \text{ lat} \quad (22a)$$

$$\bar{T}_K = T_{gr} = 6 \text{ lat} \quad (22b)$$



Rys. 2. Optymalizowany zespół i przebieg temperatur
 a - spalin, b - powietrza, c - wody - dla rozpatrywanego przy-
 kładu liczbowego

5.4. Skonstruowanie, na podstawie otrzymanych czterech wykresów, jednego wykresu o współrzędnych Δt_{sR} i $\Delta t_{sR} + \Delta t_{sK}$, przy przyjęciu jako parametru warunków (22a) i (22b). W wyniku (rys. 2e) otrzymuje się dwie krzywe. Punkt przecięcia tych krzywych określa wielkości Δt_{sR} i Δt_{sK} będące rozwiązaniem układu równań (22). Przy przyjęciu podanych na wstępie parametrów stałych otrzymuje się:

$$\Delta t_{sR_{OPT}} = 407 \text{ deg}, \quad \Delta t_{sK_{OPT}} = 413 \text{ deg}$$

5.5. Obliczenie, dla wyznaczonych w 5.4 optymalnych spadków temperatur, wielkości powierzchni poszczególnych elementów rozpatrywanego zespołu przy pomocy wzorów (13), (14), (15). Dla rozpatrywanego przykładu:

$$W_R = 25,2 \text{ m}^2, \quad W_P = 41,0 \text{ m}^2, \quad W_{PW} = 25,7 \text{ m}^2$$

5.6. Obliczenie wielkości nakładu inwestycyjnego wg wzoru (12). W rozpatrywanym przykładzie, przy założeniu $I_0 = 700000$ zł, mamy:

$$I = 1\,780\,000 \text{ zł}$$

5.7. Obliczenie rocznych oszczędności kosztów eksploatacji:

$$-\Delta K_e = 630\,000 \text{ zł/rok}$$

5.8. Obliczenie czasu zwrotu:

$$T_z = \frac{I}{-\Delta K_e} \text{ bz} = 4,35 \text{ lat}$$

Należy sprawdzić czy spełniony jest warunek $T_z \leq T_{gr}$.

5.9. Obliczenie niewiadomych parametrów układu (przebieg temperatur pokazano na rys. 1):

1. obliczenie temperatury podgrzanego powietrza

$$\Delta t_a = \frac{S}{A} \Delta t_{sR} = 540 \text{ deg}, \quad t_a = t_{ot} + \Delta t_a = 560^\circ\text{C}$$

2. obliczenie spadku temperatury spalin na parowaczu:

$$\Delta t_{sP} = \frac{K}{1'' - 1_{wz}} \Delta t_{sK} = 340 \text{ deg}$$

3. obliczenie spadku temperatury spalin na podgrzewaczu wody:

$$\Delta t_{sPW} = \Delta t_{sK} - \Delta t_{sP} = 73 \text{ deg}$$

4. obliczenie wydajności kotła:

$$\dot{G} = \frac{\dot{P}_o (1 - \omega) S \Delta t_{sP}}{r} = 0,680 \text{ t/h.}$$

LITERATURA

- [1] Instrukcja ogólna w sprawie metodyki badań ekonomicznej efektywności inwestycji, PWE, Warszawa 1962.
- [2] SZARGUT J.: Gospodarka ciepła w hutnictwie (maszynopis książki).
- [3] SZARGUT J.: Optymalizacja zakresu inwestycji usprawniającej gospodarkę energetyczną, Gospodarka Paliwami i Energią, 1968 nr 7.
- [4] SZARGUT J.: Optymalizacja zespołu rekuperatorów podgrzewających powietrze i paliwo gazowe do przeciwprądowego pieca grzejnego, Problemy Projektowe nr 9/1968.
- [5] PIOTROWICZ A.: Optymalizacja kotła bezpaleniskowego, Problemy Projektowe nr 10/1968.

ОПТИМАЛИЗАЦИЯ ВЕЛИЧИНЫ РЕКУПЕРАТОРА
И КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПОСТРОЕННЫХ К НАГРЕВАТЕЛЬНОМУ КОЛОДЦУ

Р е з ю м е

Темой работы является приближенный метод определения экономическо-мотивированной величины рекуператора и котел-утилизатора построенных к нагревательному колодцу.

Делая несколько упрощающих предположений выведено формулы определяющие капиталовложение и эксплуатационную бережливость рассматриваемого комплекса. В работе решено числовой пример.

OPTIMALIZATION MAGNITUDE OF THE REKUPERATOR
AND WASTE-HEAT BOILER DESTINED FOR THE PIT-FURNACE

S u m m a r y

The subject of this paper deals with the rough method of appointing the economical justification magnitude of the recuperator and waste-heat boiler destined for the pit-furnace. For certain reducing assumptions there are a number of the formulas determining both the investment expenditure and the reduced exploitation cost for the complex considered. Finally a numerical example has been solved.