

Mgr inż. Jan Górczyński
Instytut Techniki Ciepłej
Zakład Badań i Ekspertyz P.I.G.P.E.

METODYKA OBLICZEŃ I OPTYMALIZACJA WYMIARÓW WYMIENNIKA Z RUCHOMYM NOŚNIKIEM CIEPŁA

1. Wstęp

Wymienniki z ruchomym nośnikiem ciepła (ze złożem ruchomym) znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle, a w szczególności w przemyśle chemicznym, materiałów budowlanych, hutnictwie oraz energetyce. Wymienniki te, w porównaniu z tradycyjnymi wymiennikami przeponowymi, charakteryzują się znacznie lepszymi wskaźnikami energetycznymi, co uzasadnia coraz częstsze ich stosowanie. Dużych efektów (wysoka temperatura podgrzania powietrza, małe wymiary) można oczekiwać przy zastosowaniu tych wymienników w charakterze rekuperatorów do odzysku ciepła spalin wylotowych z pieców przemysłowych.

W [2] przedstawiono metodykę obliczania wymiennika z ruchomym nośnikiem ciepła przez analizę dwóch przykładów. W jednym założono z góry wysokość obu sekcji wymiennika i badano wpływ masowego natężenia przepływu złoża \dot{M} na temperaturę podgrzania powietrza t_{L2} . Wykazano, że funkcja $t_{L2} = f(\dot{M})$ posiada maksimum przy pewnej wartości \dot{M} . W drugim przykładzie, przy założonej temperaturze podgrzania powietrza, badano zmienność długości sekcji ochładzania w funkcji spadku temperatury złoża $v_2 - v_1$. Przy pewnej wartości tej różnicy temperatur uzyskano minimalną długość jednej sekcji wymiennika.

W niniejszej pracy, powstałej w trakcie wspólnego opracowywania przez Zakład Badań i Ekspertyz PIGPE i Instytut Techniki Ciepłej rekuperatora z ruchomym złożem dla celów prze-

myślowych, podano metodykę obliczania całkowitej długości wymiennika. Przeprowadzono również analizę wpływu podstawowych parametrów pracy wymiennika na jego wymiary całkowite, tj. rozpatrując równocześnie obie sekcje wymiennika.

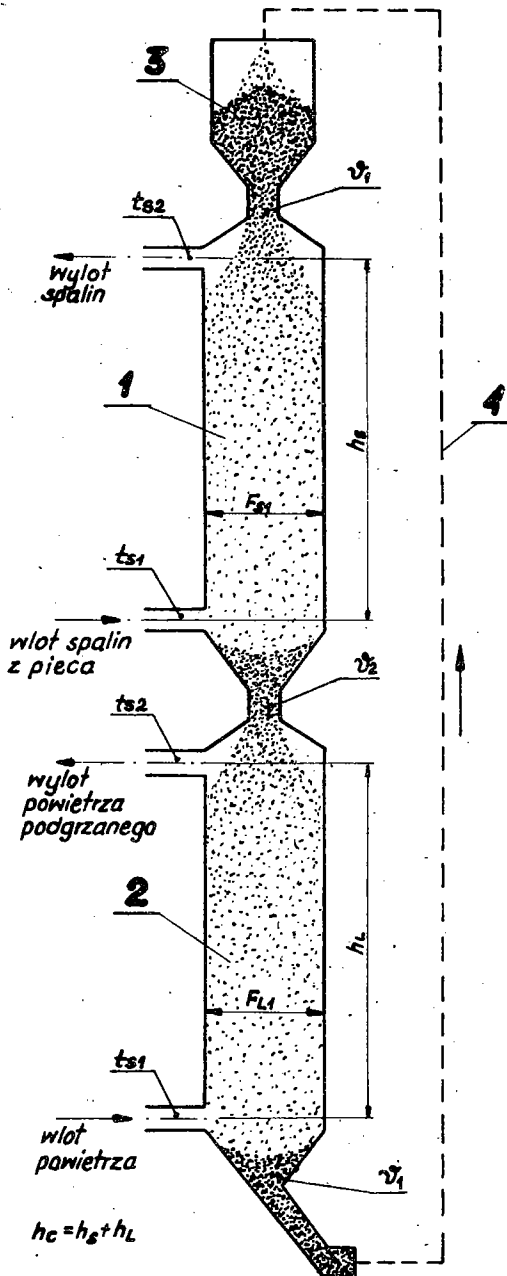
Wprowadzono zależności umożliwiające obliczenie optymalnych parametrów pracy wymiennika, tj. takich, przy których wysokość całkowita jest minimalna.

2. Schemat działania wymiennika i przyjęte założenia

Schemat ideowy rozpatrywanego wymiennika przedstawiono na rys.1. Wymiennik ten złożony jest z dwóch sekcji: sekcji nagrzewania złoża (1), w której swobodnie opadające złożo nagrzewane jest przez spaliny oraz sekcji ochładzania złoża (2), w której opadające złożo nagrzewa przepływające ku górze powietrze. Powietrze podgrzane opuszczające rekuperator doprowadzane jest do pieca jako powietrze spalania. Złożo opuszczające sekcję ochładzania transportowane jest do zasobnika (3) dowolnym urządzeniem transportu pionowego (4).

W przeprowadzonej analizie przyjęto następujące zasadnicze założenia:

- straty ciepła do otoczenia w obu sekcjach wymiennika są równe zeru,
- cząstki złoża posiadają kształt kulek o jednakowej średnicy,
- ilość spalin dopływających do wymiennika nie zależy od temperatury podgrzania powietrza w rekuperatorze,
- istnieje równomierny rozkład złoża w każdej sekcji rekuperatora,
- wymiana ciepła pomiędzy złożem i gazami odbywa się tylko przez konwekcję,
- pominięto wpływ rozkładu temperatur w cząstce na wymianę ciepła,
- własności fizyczne czynników przyjęto dla średnich arytmetycznych temperatur na wejściu i wyjściu.



Rys.1. Schemat ideowy rekuperatora z ruchomym nośnikiem ciepła (z ruchomym złożem): 1 - sekcja nagrzewania złoża, 2 - sekcja ochładzania złoża, 3 - zasobnik złoża, 4 - transport pionowy złoża

3. Analiza i wyniki

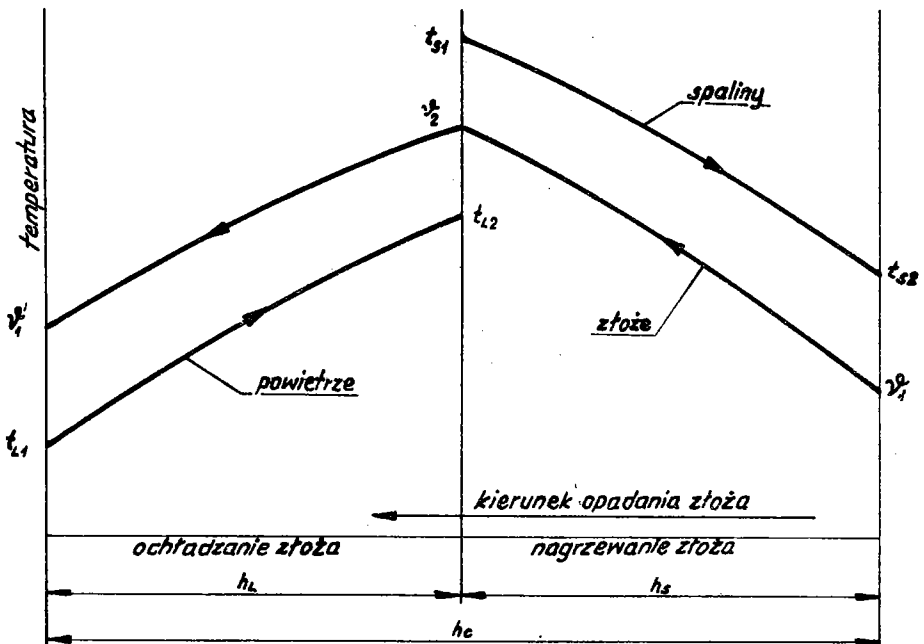
Z przewidywanego zastosowania wymiennika jako rekuperatora do podgrzewania powietrza doprowadzanego do spalania do pieca, wynikają następujące dane wyjściowe do rozważań:

- objętościowe natężenie przepływu spalin opuszczających piec - $\dot{V}_{ns'}$,
- temperatura tych spalin - t_{s1} ,
- zapotrzebowanie powietrza do spalania - \dot{V}_{nL} .

Uzupełniające dane wyjściowe:

- średnica cząstek złoża - d_m ,
- gęstość substancji złoża - ρ_m .

Ustalenie analitycznej zależności pomiędzy parametrami pracy rekuperatora możliwe jest w oparciu o równania bilansów energetycznych obu sekcji wymiennika oraz zależności opisujące wymianę ciepła. Przebieg zmienności temperatur czynników w wymienniku przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Przebieg zmienności temperatur czynników w wymienniku z ruchomym nośnikiem ciepła

Równania dla sekcji nagrzewania złoża:

- moc cieplna oddana przez spaliny równa się mocy cieplnej pobranej przez złożo

$$c_{ps} \dot{V}_{ns} (t_{s1} - t_{s2}) = c_m \dot{M} (v_2 - v_1), \quad (1)$$

- moc cieplna wymieniona między spalinami i złożem w sekcji nagrzewania równa się mocy cieplnej pobranej przez złożo

$$\alpha_s F_s \Delta t_{ns} = c_m \dot{M} (v_2 - v_1), \quad (2)$$

gdzie: $F_s = \tau_s \dot{M} f_u$, (3)

$$\Delta t_{ns} = \frac{(t_{s1} - v_2) - (t_{s2} - v_1)}{\ln \frac{t_{s1} - v_2}{t_{s2} - v_1}},$$

$$f_u = \frac{6}{\rho_m d_m}. \quad (4)$$

Z (1) i (2) otrzymano:

$$\frac{t_{s1} - t_{s2}}{v_2 - v_1} = a_s M_L, \quad (5)$$

$$\tau_s = \frac{1}{S(a_s M_L - 1)} \ln \frac{t_{s1} - v_2}{t_{s2} - v_1}, \quad (6)$$

gdzie: $m_{sL} = \frac{\dot{M}_s}{\dot{M}_L}$, (7)

$$a_s = \frac{c_m \rho_{ns}}{c_{ps} m_{sL}}, \quad (8)$$

$$M_L = \frac{\dot{M}}{\dot{M}_L}, \quad (9)$$

$$S = \frac{\alpha_s f_u}{c_m}. \quad (10)$$

Równania dla sekcji ochładzania złoża:

- moc cieplna pobrana przez powietrze równa się mocy cieplnej oddanej przez złożo

$$C_{pL} \dot{V}_{nL} (t_{L2} - t_{L1}) = c_m \dot{M} (\vartheta_2 - \vartheta'_1), \quad (11)$$

- moc cieplna wymieniona między złożem i powietrzem w wymienniku równa jest mocy cieplnej oddanej przez złożo

$$\alpha_L F_L \Delta t_{nL} = c_m \dot{M} (\vartheta_2 - \vartheta'_1), \quad (12)$$

gdzie: $F_L = \tau_L \dot{M} f_u$, (13)

$$\Delta t_{nL} = \frac{(\vartheta_2 - t_{L2}) - (\vartheta'_1 - t_{L1})}{\ln \frac{\vartheta_2 - t_{L2}}{\vartheta'_1 - t_{L1}}}. \quad (14)$$

Z (11) i (12) otrzymano:

$$\frac{t_{L2} - t_{L1}}{\vartheta_2 - \vartheta'_1} = a_L \mu_L, \quad (15)$$

$$\tau_L = \frac{1}{L(1 - a_L \mu_L)} \ln \frac{\vartheta_2 - t_{L2}}{\vartheta'_1 - t_{L1}}, \quad (16)$$

gdzie oznaczono: $a_L = \frac{c_m \varrho_{nL}}{c_{pL}}$, (17)

$$L = \frac{\alpha_L f_u}{c_m}. \quad (18)$$

Temperatury złoża: na wyjściu z sekcji ochładzania wymiennika ϑ_1 i na wejściu do sekcji nagrzewania ϑ'_1 , nie są sobie równe. Jeśli nawet założyć, że straty ciepła do otoczenia w czasie transportu pionowego złoża i w czasie przebywania tego

złoża w zasobniku są równe zero, to zmiana temperatury wynika z konieczności uzupełniania ubytków złoża unoszonego z przestrzeni wymiennika przez powietrze i spaliny. Mogą istnieć także pewne ubytki złoża w czasie transportu. W sumie ubytki te mogą być znaczne, a uzupełnianie ich złożem o niskiej temperaturze wpłynie na obniżenie temperatury złoża doprowadzającego do sekcji nagrzewania.

Założono, że istnieje następujący związek temperatur ψ_1 i ψ'_1

$$\psi_1 = \kappa \psi'_1, \quad (19)$$

gdzie: $\kappa \leq 1$ - współczynnik, który można wyznaczyć doświadczalnie w konkretnych warunkach zastosowania.

Wzory (6) i (16), po wyrugowaniu t_{s2} i ψ_1 za pomocą (5) i (15) oraz przy uwzględnieniu (19), przyjmą postać:

$$\tau_s = \frac{1}{S(a_s \mu_L - 1)} \ln \frac{t_{s1} - \psi_2}{a_1 - e_1 \psi_2}, \quad (20)$$

$$\tau_L = \frac{1}{L(1 - a_L \mu_L)} \ln \frac{\psi_2 - t_{L2}}{\psi_2 - a_2}, \quad (21)$$

gdzie: $e_1 = \kappa + a_s \mu_L (1 - \kappa)$,

$$a_1 = t_{s1} - \kappa \left(\frac{a_s}{a_L} - \frac{1}{a_L \mu_L} \right) (t_{L2} - t_{L1}),$$

$$a_2 = \frac{1}{a_L \mu_L} (t_{L2} - t_{L1}) + t_{L1},$$

$$a_3 = \frac{L(1 - a_L \mu_L)}{S(a_s \mu_L - 1)} \cdot \frac{e_1 t_{s1} - a_1}{a_2 - t_{L2}}.$$

Łączny czas przebywania cząstki w wymienniku

$$\tau = \tau_s + \tau_L. \quad (22)$$

Temperaturę złoża na wejściu do sekcji nagrzewania v_1 można obliczyć na podstawie wzoru otrzymanego z (15) i (19):

$$v_1 = \kappa \left[v_2 - \frac{1}{a_L \mu_L} (t_{L2} - t_{L1}) \right]. \quad (23)$$

Temperaturę spalin opuszczających wymiennik t_{s2} można uzyskać po skojarzeniu zależności (5), (15) i (19)

$$t_{s2} = t_{s1} - a_s \mu_L \left[v_2 (1 - \kappa) + \frac{\kappa}{a_L \mu_L} (t_{L2} - t_{L1}) \right]. \quad (24)$$

Wymiana ciepła między gazem a opadającym złożem była przedmiotem prac wielu autorów. Gorbis [1] uogólnił wyniki prac własnych i innych badaczy sprowadzając je do zależności kryterialnej

$$Nu = 0,186 Re_m^{0,8} \quad (25)$$

dla zakresu: $30 < Re_m < 480$; $Bi < 0,1$; $D/d_m > 10 \div 30$;

$q_m/q < 11000$ oraz $\beta < 3,5 \cdot 10^{-4}$.

W zakresie $480 < Re_m < 2000$ wymianę ciepła opisano równaniem

$$Nu = 1,14 Re_m^{0,5}.$$

Wg [1] przy objętościowych koncentracjach cząstek w wymienniku niższych od $\beta = 3,5 \cdot 10^{-4}$ można pominąć wpływ tej koncentracji na wymianę ciepła.

Natomiast przy $\beta > 3,5 \cdot 10^{-4}$ wpływ koncentracji opisano równaniem

$$Nu = 0,006 \cdot Re_m^{0,8} \cdot \beta^{-0,43} \quad (26)$$

w zakresie $70 < Re_m < 300$.

Liczby podobieństwa Nu i Re_m zdefiniowane są następująco:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_m}{\lambda},$$

$$Re_m = \frac{w_w d_m}{\nu}.$$

Dalszą analizę pracy wymiennika przeprowadzono w oparciu o opis wymiany ciepła ujęty zależnością (25). Na podstawie tej zależności otrzymano wzór umożliwiający obliczenie współczynnika przejmowania α

$$\alpha = 3,46 d_m^{0,6} \rho_m^{0,533} \lambda \cdot \nu^{-0,8}. \quad (27)$$

W [2] udowodniono, że dla powietrza i spalin w granicach $\pm 5\%$ można założyć $\lambda \cdot \nu^{-0,8} \cong 755 t^{-1/3}$,
stąd

$$\alpha = 2,615 \cdot 10^3 d_m^{0,6} \rho_m^{0,533} t^{-1/3}. \quad (27a)$$

Współczynnik przejmowania ciepła zależy zatem głównie od średnicy cząstek d_m i od gęstości materiału złoża ρ_m oraz w niewielkim stopniu od temperatury czynnika.

Wysokość czynna obu sekcji wymiennika

$$h_c = w_{as} \tau_s + w_{aL} \tau_L. \quad (28)$$

Ze względu na niewielkie różnice założono

$$w_{as} = w_{aL} = w_a,$$

stąd

$$h_c = w_a (\tau_L + \tau_s). \quad (28a)$$

lub

$$h_c = w_a \tau.$$

Wysokość poszczególnych sekcji wymiennika:

$$h_s = w_a \tau_s,$$

$$h_L = w_a \tau_L.$$

(29)

Prędkość opadania cząstek złoża w_a przyjmowana jest w zależności od prędkości względnej w_w .

Przy założeniu współczynnika oporu cząstki opadającej wg [2]

$$c_x = 13 \cdot Re_m^{-1/2},$$

prędkość względną w_w można wyrazić związkami

$$w_w = \frac{d_m \rho_m^{2/3}}{\nu^{1/3} \rho^{2/3}}. \quad (30)$$

Prędkość opadania

$$w_a = \psi w_w. \quad (31)$$

Wg [2] wartości stosunku ψ zaleca się przyjmować w zakresie 0,3 - 0,4.

Należy jednakże podkreślić, że w przypadku, gdy złoża stanowią cząstki o znacznym zróżnicowaniu średnic, wówczas wybór wartości ψ powinien być raczej podyktowany dążeniem do uzyskania pomijalnie małej wartości ilości unoszonego złoża z wymiennika przez spaliny lub powietrze. Ponieważ we wzorze (30) wartość iloczynu $\nu^{1/3} \rho^{2/3}$ praktycznie nie zmienia się z temperaturą [2], stąd

$$w_a \cong 39 \psi d_m \rho_m^{2/3}. \quad (32)$$

Prędkość opadania zależy tylko od średnicy cząstek złoża oraz od jego gęstości. Na tej podstawie można stwierdzić, że (uwzględniając wzór (28a)) analiza i wybór wysokości wymiennika sprowadza się do analizy czasu przebywania cząstek w wymienniku.

Prędkość przepływu czynników w wymienniku równa jest różnicy prędkości względnej w_w i prędkości opadania cząstek w_a

$$w = w_w - w_a = (1 - \psi)w_w.$$

Wykorzystując (30) otrzymano

$$w = (1 - \psi) \frac{d_m q_m^{2/3}}{v^{1/3} q^{2/3}} \quad (33)$$

lub

$$w = 39(1 - \psi) d_m q_m^{2/3}. \quad (33a)$$

Z zależności (20), (21) i (28a) wynika, że podstawowymi wielkościami wpływającymi na wysokość wymiennika są:

- wymagana temperatura podgrzania powietrza - t_{L2} ,
- temperatura podgrzania złoża w sekcji nagrzewania - t_2 ,
- względne masowe natężenie przepływu złoża - μ_L .

Współczynniki przejmowania ciepła α_s i α_L , zawarte w wielkościach s i L , z uwagi na zależność (27a) i założoną stałą średnicę cząstek d_m , mogą być wyłączone z rozważań.

Wymaga podkreślenia fakt, że wysokość wymiennika nie zależy od ilości czynników przepływających przez ten wymiennik. Wysokość ta zależy jedynie od stosunku masowych natężeń przepływów spalin i powietrza m_{sL} oraz od μ_L . Rozważania dotyczące wysokości wymiennika można więc prowadzić niezależnie od wielkości (wydajności) pieca, przy którym ma on być zabudowany.

Wybór temperatury podgrzania powietrza w rekuperatorze t_{L2} jest odrębnym zagadnieniem nie rozpatrywanym szczegółowo w niniejszej pracy. Zaznaczyć jedynie można, że wybór ten jest uwarunkowany przez:

- z jednej strony konieczność uzyskania wysokiej temperatury w przestrzeni roboczej pieca, co często jest niemożliwe bez podgrzania powietrza do odpowiednio wysokiej temperatury (np. z uwagi na niską wartość opałową paliwa),
- z drugiej strony ograniczenie z uwagi na maksymalnie dopuszczalną temperaturę nagrzania złoża,
- konieczność uzyskania możliwie największego efektu ekonomicznego rozumianego jako różnica oszczędności wynikających z zastosowania rekuperatora i kosztów związanych z jego budową i eksploatacją.

Temperatura podgrzania złoża w sekcji nagrzewania ϑ_2 decyduje o proporcjach wysokości obu sekcji wymiennika, co wpływa zasadniczo na całkowitą jego wysokość. Wzrost temperatury ϑ_2 powoduje nadmierne wydłużenie sekcji nagrzewania złoża spowodowane obniżeniem różnicy temperatur pomiędzy spalinami i złożem.

Związane jest to z równoczesnym skracaniem sekcji ochładzania z powodu wzrostu różnicy temperatur pomiędzy czynnikami. Zmniejszanie temperatury ϑ_2 powoduje skutek odwrotny, tzn. wydłużanie sekcji ochładzania i skracanie sekcji nagrzewania. Funkcja $\tau = f(\vartheta_2)$ powinna więc osiągać minimum przy pewnej wartości temperatury ϑ_2 ; jest to równoznaczne z minimalną wysokością h_c wymiennika. Różniczkowanie zależności (22) daje wyrażenie na optymalną temperatur ϑ_2

$$\vartheta_{2\text{opt}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (34)$$

gdzie: $a = a_3 - e_1$,

$$b = t_{s1} e_1 + a_1 - a_3 t_2 - a_3 a_2,$$

$$c = a_3 a_2 t_2 - t_{s1} a_2.$$

Przebieg τ , τ_s i τ_L w funkcji temperatury złoża ϑ_2 przedstawiono na rys.3.

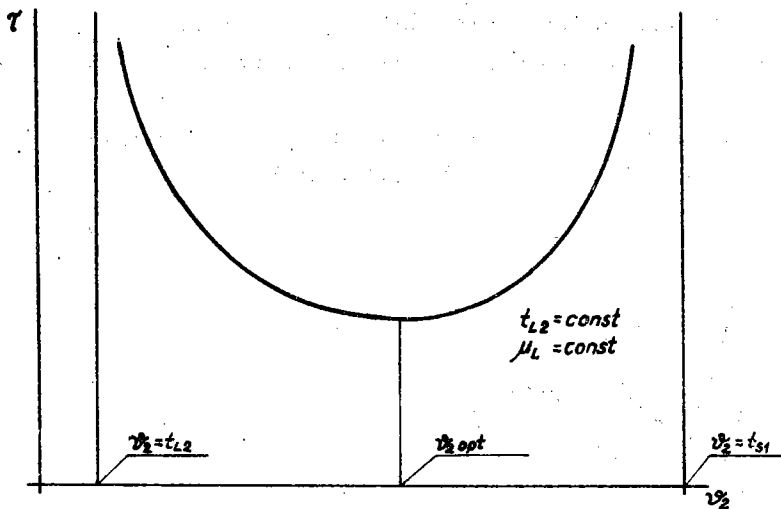
W pobliżu punktu $\vartheta_{2\text{opt}}$ krzywa $\tau = f(\vartheta_2)$ posiada płaski przebieg; pozwala to na możliwość zmiany temperatury ϑ_2 w pewnym zakresie przy niewielkim wzroście wysokości wymiennika.

Należy przy tym podkreślić, że im mniejsza jest różnica temperatur (doprowadzanych spalin t_{s1} i podgrzanego powietrza t_{L2}), tym bardziej stromy przebieg w pobliżu minimum posiada rozpatrywana krzywa.

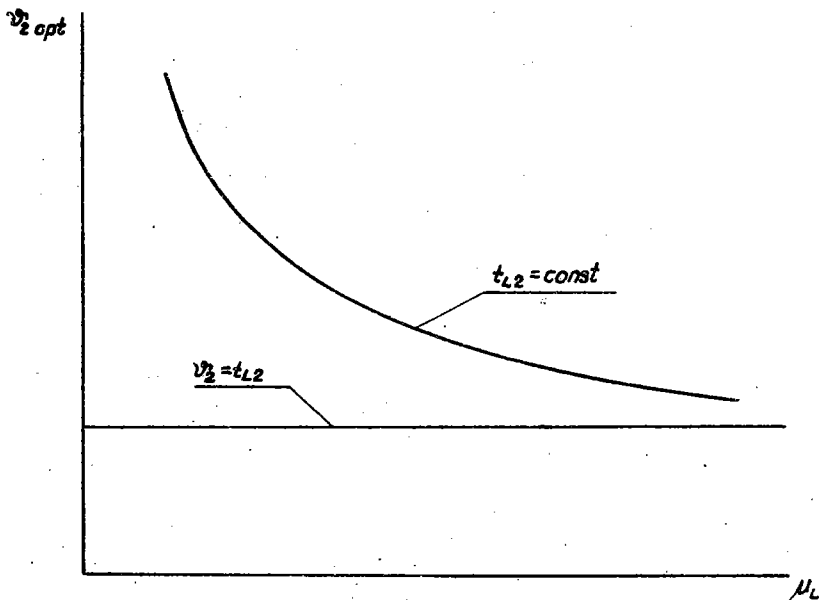
Wartość optymalnej temperatury podgrzania złoża w sekcji nagrzewania $\vartheta_{2\text{opt}}$ (wg wzoru (34)) zależy od μ_L .

Ze wzrostem wartości μ_L maleje optymalna temperatura $\vartheta_{2\text{opt}}$ przyjmując, przy dużych wartościach μ_L , wartość zbliżoną do temperatury podgrzania powietrza t_{L2} (rys.4).

Można wykazać, że istnieje wartość μ_L , przy której uzyskuje się minimalną wysokość wymiennika. Analityczne znalezie-



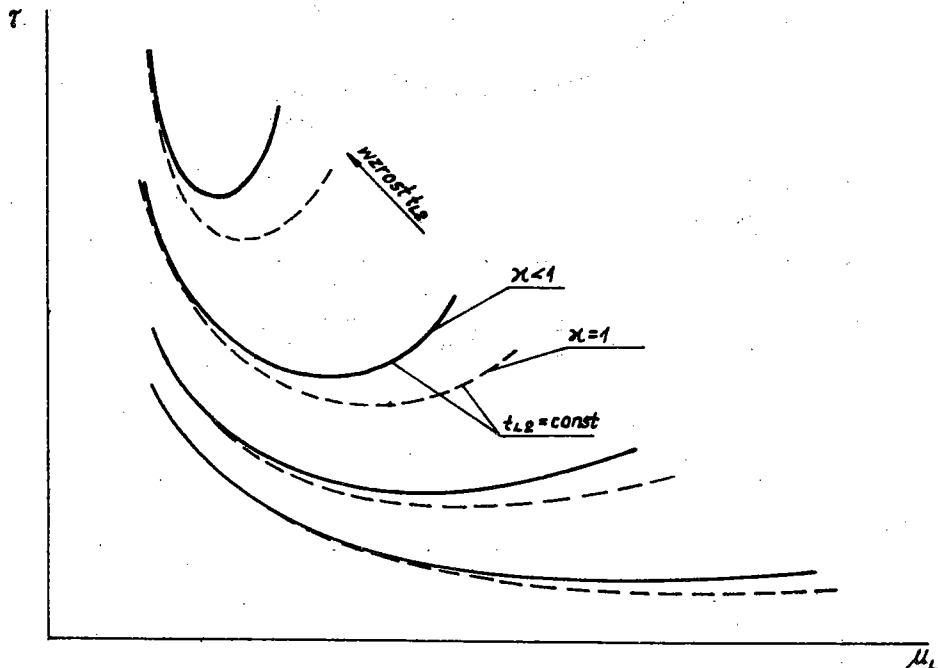
Rys.3. Czas przebywania cząstek w wymienniku w funkcji temperatury podgrzania złoża v_2



Rys.4. Zależność $v_2^{opt} = f(\mu_L)$

nie optymalnej wartości μ_L , jest praktycznie niemożliwe z uwagi na skomplikowane zależności. Wyznaczenie $\mu_{L \text{ opt}}$ można przeprowadzić wykreślnie, na podstawie związków (20), (21), (30).

Na rys.5 przedstawiono zależność czasu przebywania cząstki w wymienniku w funkcji natężenia przepływu złoża przy różnych



Rys.5. Czas przebywania cząstek w wymienniku τ w funkcji natężenia przepływu złoża μ_L , przy optymalnych temperaturach $t_{L2 \text{ opt}}$

(stałych) temperaturach podgrzania powietrza. Przy niższych temperaturach t_{L2} minimum τ , występuje przy wyższych wartościach μ_L , a krzywa przyjmuje charakter bardziej płaski.

Dla danej temperatury t_{L2} istnieje pewna maksymalna wartość μ_L , powyżej której niemożliwe jest uzyskanie żądanej wartości t_{L2} . Na rys.5 linie ciągłe dotyczą przypadku, w którym $\chi < 1$ (tzn. $v'_1 > v_1$). Naniesiono na wykres także odpowiednie zależności przy $\chi = 1$. Wykonane wykreślnie zależności świadczą o tym, że spadek temperatury złoża opuszczającego

wymiennik ψ_1 (do wartości ψ_1) przy jego powrocie do urządzenia posiada duży wpływ na wysokość wymiennika oraz na optymalną wartość μ_L . Przy zmniejszeniu κ długość wymiennika rośnie oraz maleje $\mu_{L \text{ opt}}$.

Powierzchnię poprzecznego przekroju wymiennika można wyznaczyć na podstawie wzorów:

- dla sekcji nagrzewania złoża

$$F_{s1} = \frac{\dot{V}n_s}{w_s} \cdot \frac{T_s}{T_n}; \quad (35)$$

- dla sekcji ochładzania złoża

$$F_{L1} = \frac{V_{nL}}{w_L} \frac{T_L}{T_n}. \quad (36)$$

Z założenia $w_{as} = w_{aL} = w_a$, wynika $w_s = w_L = w$ (wzór (33a)).

Ze wzorów (35) i (36) wynika, że powierzchnie F_{s1} i F_{L1} zależą tylko od ilości czynników i ich temperatur (przy stałej średnicy cząstek d_m).

W dotychczasowych rozważaniach, zgodnie z przyjętym założeniem, nie analizowano wpływu średnicy cząstek d_m na wielkość wymiennika. O ile przy obliczaniu wymiennika istnieje możliwość wyboru średnicy cząstki, wówczas należy przeanalizować wpływ tej średnicy na parametry pracy i wymiary wymiennika.

Wykorzystując związki (20), (21), (22), (28a), (32) można, za pomocą zwykłych przekształceń algebraicznych, udowodnić następujące zależności:

- ze wzrostem średnicy d_m maleje żądany czas pobytu cząstki w wymienniku spowodowany wzrostem współczynników przejmowania

$$\tau_c \sim d_m^{-0,4},$$

- wzrasta wysokość wymiennika h_c ze wzrostem średnicy d_m , ponieważ mimo wzrostu współczynników przejmowania szybszy jest wzrost prędkości opadania cząstek

$$h_c \sim d_m^{0,6},$$

- objętość wymiennika V_c maleje ze wzrostem średnicy d_m

$$V_c \sim d_m^{-0,4}.$$

Ten spadek objętości wymiennika spowodowany jest tym, że mimo wzrostu wysokości szybciej maleje jego powierzchnia przekroju poprzecznego na skutek zwiększenia prędkości przepływu czynników (spalin i powietrza) przez wymiennik.

Stosunek przekrojów obu sekcji nie zmienia się ze zmianą d_m .

Ze wzoru (34) wynika ponadto, że średnica cząstek d_m nie wpływa na $\psi_2 \text{ opt}$.

Z powyższej analizy wynika, że średnica cząstek nie posiada wpływu na charakter przebiegu zależności rozpatrywanych w niniejszej pracy.

4. Wnioski

Na podstawie przyjętych na wstępie założeń opracowano metodę obliczania i minimalizacji wymiarów wymiennika z ruchomym złożem przewidzianego do zastosowania jako rekuperator ciepła spalin. Dla określonej ilości spalin z pieca i znanej ich temperatury, przy określonym zapotrzebowaniu powietrza oraz przy założonej średnicy cząstek złoża, można tak zaprojektować rekuperator z ruchomym nośnikiem ciepła, aby żadaną temperaturę podgrzania powietrza uzyskać przy minimalnej jego wysokości.

Przy wysokich temperaturach podgrzania powietrza stosunkowo niewielka zmiana ψ_2 i μ_L od wartości optymalnych może spowodować znaczny wzrost wysokości wymiennika.

Pominięcie spadku temperatury złoża w czasie jego transportu pionowego może prowadzić do błędnego obliczenia wymiennika.

5. Przykład obliczeniowy

Na podstawie przedstawionej metodyki obliczeń przeprowadzono przykładowo obliczenie optymalnych parametrów pracy i optymalnych wymiarów rekuperatora ciepła spalin z ruchomym nośnikiem ciepła, do podgrzewania powietrza spalania w piecu opalanym gazem ziemnym.

Dane wyjściowe:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ns} &= 0,8 \text{ nm}^3/\text{s}; \quad \rho_{ns} = 1,241 \text{ kg/nm}^3; \quad \dot{M}_s = 0,994 \text{ kg/s}; \\ \dot{V}_{nL} &= 0,728 \text{ nm}^3/\text{s}; \quad \rho_{nL} = 1,293 \text{ kg/nm}^3; \quad \dot{M}_L = 0,941 \text{ kg/s}; \\ t_{s1} &= 900^\circ\text{C}; \\ t_{L1} &= 20^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Wymagana temperatura podgrzania powietrza $t_{L2} = 700^\circ\text{C}$.
Jako nośnik ciepła zastosowano piasek o danych:

$$d_m = 0,4 \text{ mm}, \quad \rho_m = 2600 \text{ kg/m}^3,$$

założono $\kappa = 0,75$.

Poniżej przedstawiono kolejność obliczeń:

1. Dla temperatur czynników wg danych wyjściowych przyjęto szacunkowe wartości średniego ciepła właściwego:

$$c_{pL} = 1,372 \text{ kJ/nm}^3 \text{ deg} - \text{wg [3]},$$

$$c_{ps} = 1,579 \text{ kJ/nm}^3 \text{ deg} - \text{wg [3]},$$

$$c_m = 1,173 \text{ kJ/kg deg} - \text{wg [4]}.$$

2. Stosunek masowych natężeń przepływów spalin i powietrza

$$m_{sL} = 1,055,$$

3. Umowna powierzchnia wymiany ciepła 1 kg złoża; na podstawie wzoru (3), $f_u = 5,77 \text{ m}^2/\text{kg}$,

4. Współczynniki przejmowania ciepła, wg wzoru (27a):

$$\alpha_L = 291 \text{ w/m}^2\text{deg},$$

$$\alpha_s = 315 \text{ w/m}^2\text{deg},$$

5. Obliczenie stałych a_L , a_S , L i S na podstawie wzorów (8), (10), (17) i (18):

$$a = 1,1054; \quad a_S = 0,8738;$$

$$L = 1,429; \quad S = 1,549,$$

6. Obliczenie $\psi_2 \text{ opt}$ dla założonej wartości μ_L . Założono $\mu_L = 1,2$. Po przeprowadzeniu obliczeń wg wzorów (34) otrzymano wartości stałych:

$$a = 0,0836; \quad b = 442; \quad c = 38,5 \cdot 10^4.$$

Na tej podstawie obliczono

$$\psi_2 \text{ opt} = 761^\circ\text{C}.$$

7. Obliczenie temperatury złoża wprowadzanego do sekcji nagrzewania wymiennika ψ_1 wg wzoru (15)

$$\psi_1 = 186^\circ\text{C}.$$

8. Obliczenie temperatury złoża odprowadzanego z sekcji ochładzania; wg (19) otrzymano

$$\psi_1' = 248^\circ\text{C}.$$

9. Obliczenie temperatury spalin opuszczających wymiennik na podstawie wzoru (24); otrzymano

$$t_{s2} = 295^\circ\text{C}.$$

Następnie należy skorygować (powtórnie przeprowadzić) obliczenia wg p. 1 ÷ 9. W omawianym przypadku wyznaczone ciepła właściwe praktycznie nie różniły się od wartości w p.1, dlatego zaniechano powtórnego obliczenia $\psi_2 \text{ opt}$ i pozostałych temperatur.

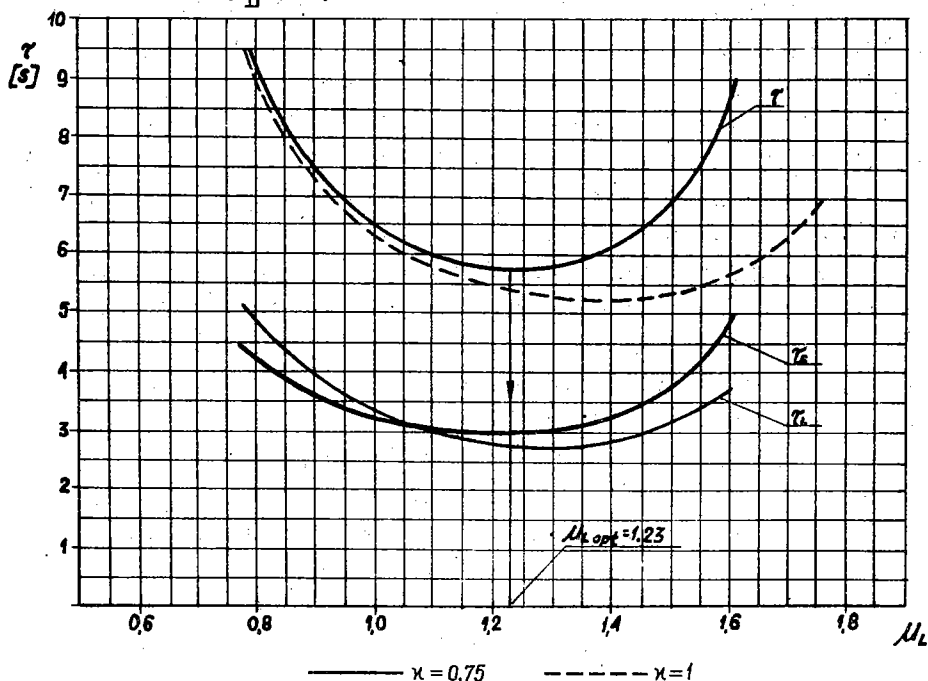
10. Wykorzystując wzory (20), (21) i (22) dla obliczonej poprzednio temperatury $\psi_2 \text{ opt}$ obliczono czas przebywania cząstek w wymienniku:

$$\tau_s = 2,98 \text{ s}; \quad \tau_L = 2,82 \text{ s};$$

$$\tau = 5,80 \text{ s}.$$

11. Obliczenia wg dotychczasowej kolejności p. 1 ÷ 9 wykonano dla kilku założonych wartości $\mu_L = 0,8; 1,0; 1,2; 1,4$ i $1,6$.

Na podstawie wykonanych obliczeń sporządzono wykresną zależność $\tau = f(\mu_L)$, rys.6.



Rys.6. Zależność $\tau = f(\mu_L)$ - przykład obliczeniowy

Przy $\mu_L = 1,23$ wymagany czas przebywania cząstek w wymienniku jest najkrótszy.

Na wykresie rys.6 przedstawiono także czasy przebywania cząstek w poszczególnych sekcjach wymiennika τ_s i τ_L .

Zwracają uwagę stosunkowo niewielkie różnice czasu τ_s i τ_L w pobliżu τ_{min} i płaski przebieg ich wartości w funkcji μ_L . Ponadto w pobliżu τ_{min} również wykazują minimalne wartości τ_s i τ_L .

Zatem przeprowadzenie obliczeń wymiennika wg przedstawionej metodyki zapewnia osiągnięcie minimalnych długości obu jego sekcji.

Na rys.6 (linia kreskowana) pokazano zależność czasu przebywania cząstek w wymienniku od μ_L przy założeniu, że temperatura $v'_1 = v_1$ (tzn. $\kappa = 1$).

W celu uzyskania tej krzywej przeprowadzono obliczenia jak wyżej dla $\kappa = 0,75$.

W tym przypadku ($\kappa = 1$) minimalny wymagany czas przebywania cząstek w wymienniku jest niższy niż przy $\kappa = 0,75$ oraz osiągnany jest przy znacznie wyższych wartościach μ_L .

Przy wartościach $\mu_L < \mu_{L \text{ opt}}$ krzywe (dla $\kappa = 0,75$ i $\kappa = 1,0$) prawie pokrywają się, natomiast przy $\mu_L > \mu_{L \text{ opt}}$ i w pobliżu $\mu_{L \text{ opt}}$, różnice czasów przebywania w obu przypadkach są znaczne, wzrastając ze wzrostem μ_L .

12. Dla wyznaczonej wykreślnie wartości $\mu_{L \text{ opt}} = 1,23$ należy przeprowadzić ponownie wszystkie obliczenia wg p. 1÷11. W rozpatrywanym przypadku zaniechano powtórnych obliczeń ponieważ założona na wstępie wartość $\mu_L = 1,2$ różni się nieznacznie od wartości optymalnej.

Jak wynika z wykresu rys.6 wartości τ , τ_s i τ_L zmieniają się przy tym również nieznacznie.

13. Obliczenie prędkości opadania cząstek wg przybliżonego wzoru (32); po wykonaniu obliczeń otrzymano

$$w_a = 1,03 \text{ m/s.}$$

Przyjęto współczynnik $\psi = 0,35$.

14. Wysokość wymiennika wg wzorów (29):

$$h_s = 3,07 \text{ m; } h_L = 2,90 \text{ m;}$$

$$h_c = 5,97 \text{ m.}$$

15. Prędkość przepływu czynników w obu sekcjach wymiennika, wg (33)

$$w = 1,86 \text{ m/s.}$$

16. Powierzchnię przekroju każdej z sekcji wymiennika obliczono wg (35) i (36), uwzględniając równość $w_s = w_L = w$:

$$F_{s1} = 1,374 \text{ m}^2 - \text{przy średniej temperaturze spalin w wymienniku } T_s = 871 \text{ K,}$$

$$F_{L1} = 0,908 \text{ m}^2 - \text{przy średniej temperaturze powietrza w wymienniku } T_L = 633 \text{ K.}$$

17. Objętości obu sekcji wymiennika:

$$V_s = 4,22 \text{ m}^3,$$

$$V_L = 2,64 \text{ m}^3,$$

$$V_c = 6,86 \text{ m}^3.$$

Oznaczenia

- Bi - liczba Biota
- c_x - współczynnik oporu cząstek opadającego złoża
- c_m - ciepło właściwe cząstek złoża, kJ/kg deg
- c_p - ciepło właściwe czynnika, kJ/nm³ deg
- d_m - średnica cząstek złoża, m
- D - średnica wymiennika, m
- f_u - powierzchnia zewnętrzna cząstek 1.kg złoża, m²/kg
- F - powierzchnia wymiany ciepła, m²
- F_1 - powierzchnia poprzecznego przekroju, m²
- h - wysokość wymiennika, m
- \dot{M} - natężenie przepływu złoża, kg/s
- \dot{M}_s - masowe natężenie przepływu spalin, kg/s
- \dot{M}_L - masowe natężenie przepływu powietrza, kg/s
- Nu - liczba Nusselta
- Re_m - liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy cząstki złoża
- t - temperatura czynnika, K
- Δt_n - logarytmiczna różnica temperatur w sekcji wymiennika, deg
- V - objętość wymiennika, m³
- \dot{V}_n - natężenie przepływu czynnika w warunkach normalnych fizycznych, nm³/s
- w - prędkość czynnika, m/s

- w_a - prędkość opadania cząstek złoża, m/s
 w_w - prędkość opadającej cząstki złoża względem powietrza, m/s
 α - współczynnik przejmowania ciepła pomiędzy cząstkami złoża i przepływającym czynnikiem, $w/m^2 \text{ deg}$.
 β - koncentracja objętościowa cząstek w wymienniku, m^3/m^3
 ϑ - temperatura złoża, K
 κ - mnożnik charakteryzujący obniżenie temperatury złoża w czasie transportu pionowego i w zasobniku
 λ - przewodność cieplna, $w/m \text{ deg}$
 μ_L - stosunek masowych natężeń przepływów złoża i powietrza, kg/kg
 ν - kinematyczny współczynnik lepkości, m^2/s
 ρ - gęstość czynnika w warunkach rzeczywistych, kg/m^3
 ρ_m - gęstość ziaren złoża, kg/m^3
 τ - czas przebywania cząstek w wymienniku, s
 ψ - stosunek prędkości opadania złoża w_a do prędkości względnej w_w

Indeksy

- L - powietrze, s - spaliny, n - warunki normalne fizyczne,
c - przestrzeń czynna wymiennika, m - złożo,
min - minimum, opt - optimum.
Szczegółowe oznaczenia temperatur - na rys.2.

Bibliografia

1. Gorbis Z.R.: Tęploobmien dispersnych skwoznych potokow. Izd. Energia. Moskwa 1964.
2. Ljuboszcic I.L.: Tęploobmien w regeneratiwnom tęploobmien-
nikie s padjuszczim słojem. Woprosy intensyfikacji pierie-
nosa tępla i massy w suszilych i termiczeskich proces-
sach. Izd. Nauka i Tęchnika. Mińsk 1967.
3. Staniszcwski B.: Wymiana ciepła. Podstawy Teoretyczne PWN.
Warszawa 1963.

4. Tiebieńkow B.P.: Rekuperatory dla promyszelnykh pieczey. Izd. Metałłurgia. Moskwa 1967.
5. Chodorow E.I.: Pieczy cementnoj promyszlenosti. Izd. SI. Leningrad 1968.
6. Ražnjevič K.: Tablice cieplne z wykresami. WNT. Warszawa 1965.

Методика расчѐта и оптимализация размеров теплообменника
с падающим слоем

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

На основе известных зависимостей из области теплообмена и аэродинамики представлено метод расчѐта и оптимализации размеров теплообменника с падающим слоем, использованного с целью рекуперации Физического тепла газов отходящих из промышленных печей. Представлено методику базирующуюся на принципе стальной тепловой мощности теплообменника. Применяя предложенный метод для заданного расхода продуктов сгорания из печи и известной их температуре, при определенном расходе воздуха и заданном диаметре частиц дисперсного теплоносителя можно проектировать рекуператор с падающим слоем так, чтобы искомую температуру подогрева воздуха получить при минимальной высоте рекуператора. В конце статьи приведен пример решения с целью лучшего разъяснения разработанной методики расчѐта.

The Method of Calculation and Optimization of Dimensions
of a Heat Exchanger with Moving Bed

S u m m a r y

On the basis of known relationship in regards to heat exchange and aerodynamics a method was worked out for the calculation and optimization of dimensions of the heat exchanger

with a movable (sinking) bed for the use as a heat recuperator of the combustion gases leaving the combustion chamber.

The given method was based on the assumption of the required air heating temperature. On the basis of the worked out method for the given amount of the waste gases leaving the combustion chamber and its known temperature- with a given air demand and diameter of the particles of the bed, the recuperator with a moving bed can be so designed as to obtain the required heated air temperature with its minimum height. An example of the calculation is given at the end in order to better elucidation of the presented calculation methods.

Rękopis dostarczono w styczniu 1970 r.