

Joachim Kozioł
Jan Składzień
Instytut Techniki Ciepłej

WYZNACZANIE ZALEŻNOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA OD CZASU PRACY DLA REKUPERATORÓW IGŁOWYCH

Streszczenie. W artykule rozpatrzono zmienność współczynnika przenikania ciepła w rekuperatorach igłowych, w zależności od czasu ich pracy. Założono funkcję określającą ten związek, a następnie pokazano sposób doboru stałych w oparciu o wyniki pomiarów. Pomiary takie przeprowadzono na rzeczywistych obiektach i w oparciu o nie określono średnią wartość współczynnika przenikania dla typowych okresów działania rekuperatorów.

1. Wstęp

Współczynnik przenikania ciepła w rekuperatorach hutniczych zmienia się w miarę upływu czasu ich eksploatacji. Dotyczy to zwłaszcza rekuperatorów igłowych. W miarę upływu czasu działania rekuperatora na powierzchni jego elementów osadzają się zanieczyszczenia powodujące zwiększenie oporu przepływu ciepła oraz powstają nieszczelności powodujące częściowy przepływ czynnika ogrzewanego do spalin. W efekcie zmniejsza się wartość współczynnika przenikania ciepła, a co za tym idzie następuje spadek temperatury czynnika podgrzewanego przy wypływie z rekuperatora. Zanieczyszczenia wywołane są erozją ścian pieca, unoszeniem przez spaliny zgorzeliny oraz osadzaniem się pyłu zawartego w paliwie. Nieszczelności wynikają z wypadnia i przepalania się uszczelnień oraz pęknięcia elementów w trakcie pracy rekuperatora.

Zmiana współczynnika przenikania ciepła zależy niewątpliwie od rodzaju pieca, jakości paliwa oraz warunków eksploatacyjnych. Wydaje się jednak, że ogólny charakter zmienności współczynnika będzie dla różnych warunków konstrukcyjnych i eksploatacyjnych pieca podobny jakościowo, różnice będą jedynie typu ilościowego.

2. Pozorny współczynnik przenikania ciepła

Częściowy przepływ czynnika ogrzewanego do spalin wpływa bezpośrednio na zmianę wartości pojemności cieplnych przepływających gazów, a pośrednio na zmianę wartości współczynnika przenikania ciepła wzdłuż powierzchni re-

kuperatora. W pracy postanowiono obliczenia oprzeć o pozorny współczynnik przenikania ciepła obliczany w stosunku do entalpii czynnika ogrzewanego opuszczającego rekuperator i wyznaczany ze wzoru

$$k = \frac{\dot{V} C_p \Delta t}{F \Delta t_{\text{śr}}} \quad (1)$$

gdzie:

- \dot{V} - strumień masy czynnika ogrzewanego opuszczającego rekuperator,
- C_p - właściwa pojemność cieplna przy stałym ciśnieniu czynnika,
- Δt - przyrost temperatury czynnika ogrzewanego,
- F - powierzchnia przepływu ciepła,
- $\Delta t_{\text{śr}}$ - średnia logarytmiczna różnica temperatur w rekuperatorze.

Przyjęcie pozornego współczynnika k przenikania ciepła narzuca konieczność konsekwentnego przestrzegania przyjętej umowy we wszystkich obliczeniach, w których się go wykorzystuje.

3. Określenie funkcji $k = k(\tau)$

Funkcja określająca zależność współczynnika przenikania ciepła od czasu pracy rekuperatora $k = k(\tau)$ winna spełniać dwa warunki: mieć nieskomplikowany charakter oraz mieć uzasadnienie teoretyczne. Na początku bowiem ($\tau = 0$) współczynnik k ma największą wartość, po czym maleje najpierw dość szybko, potem coraz wolniej, nie osiągając wartości zerowej nawet dla czasu $\tau \rightarrow \infty$. Dzieje się tak, gdyż w miarę upływu czasu pracy rekuperatora na powierzchni elementów grzejnych będą osadzać się zanieczyszczenia powodujące spadek wielkości k , jednak w rzeczywistości wartość tego współczynnika nawet przy długim okresie działania nie spadnie do zera. Wymagania powyższe spełnia zależność:

$$k = A + B e^{-C\tau} \quad (2)$$

gdzie A , B i C są wielkościami stałymi. Na początku pracy rekuperatora ($\tau = 0$) k osiąga wartość największą, równą:

$$k_0 = A + B \quad (3)$$

Dla $\tau \rightarrow \infty$ zachodzi:

$$k_{\infty} = A \quad (4)$$

Wzór (2) można również przedstawić w postaci:

$$k = k_0 [a + (1 - a) e^{-Cr}] \quad (5)$$

gdzie wyrażenie w nawiasie kwadratowym stanowi poprawkę współczynnika k zależną od czasu.

3. Opis sposobu przeprowadzania obliczeń

Dla kompletu danych pomiarowych opisujących chwilowe parametry pracy rekuperatora aktualny współczynnik przenikania ciepła k oblicza się z zależności:

$$k_1 = \frac{V_1 C_{p1} \Delta t_1}{F \Delta t_{sr1}} \quad (6)$$

gdzie indeks 1 oznacza wartości odpowiadające kolejnym punktom pomiarowym.

Mając wielkości k_1 dla poszczególnych dni oblicza się następnie współczynniki A i B występujące w zależności (2) przy ustalonym uprzednio C . Współczynniki te oblicza się metodą najmniejszych kwadratów. Jeśli weźmie się pod uwagę sumę kwadratów odchylek $\sum_1^n [k_1 - (A + B e^{-Cr_1})]^2$, w której k_1 jest rzeczywistym współczynnikiem przenikania ciepła odpowiadającym czasowi τ_1 , to po zróżniczkowaniu tej sumy względem wielkości A i B i przyrównaniu pochodnych do zera otrzymuje się układ dwóch równań z dwiema niewiadomymi. Rozwiązanie tego układu ma postać:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n k_1 \sum_{i=1}^n e^{-2Cr_1} - \sum_{i=1}^n e^{-Cr_1} \sum_{i=1}^n k_1 e^{-Cr_1}}{n \sum_{i=1}^n e^{-2Cr_1} - \left(\sum_{i=1}^n e^{-Cr_1} \right)^2} \quad (7)$$

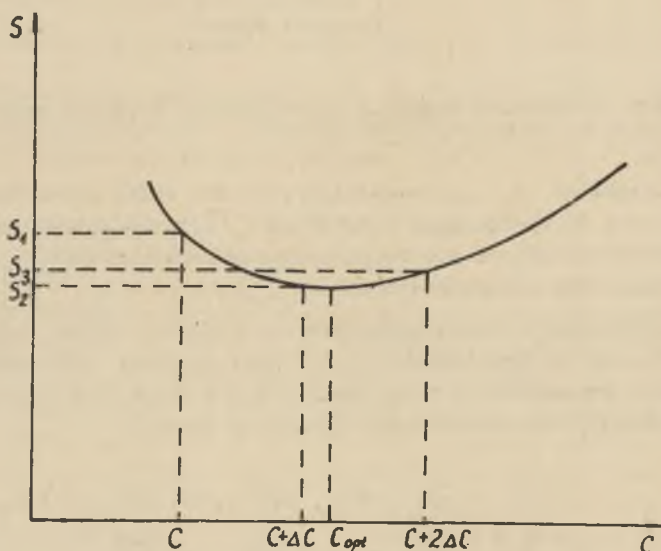
$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n k_1 e^{-Cr_1} - \sum_{i=1}^n k_1 \sum_{i=1}^n e^{-Cr_1}}{n \sum_{i=1}^n e^{-2Cr_1} - \left(\sum_{i=1}^n e^{-Cr_1} \right)^2} \quad (8)$$

gdzie n jest liczbą rozpatrywanych punktów pracy rekuperatora.

Najważniejszy problem stanowi dobór właściwego wykładnika potęgowego C . Rozpatruje się różne wartości C , począwszy od C bardzo bliskiego zeru i dla każdej z nich po określeniu stałych A i B oblicza się sumę kwadratów odchyłek S pomiędzy wartościami rzeczywistymi k_1 oraz wyznaczonymi z zależności (2):

$$S = \sum_{i=1}^n [k_1 - (A + B e^{-C t_1})]^2 \quad (9)$$

Najwłaściwsza będzie taka wartość $C = C_{opt}$, dla której suma powyższa osiąga wartość minimalną. Aby skrócić czas obliczeń przyjęto, że w pobliżu optymalnego wykładnika C_{opt} krzywa $S = S(C)$ ma charakter paraboliczny (rys. 1).



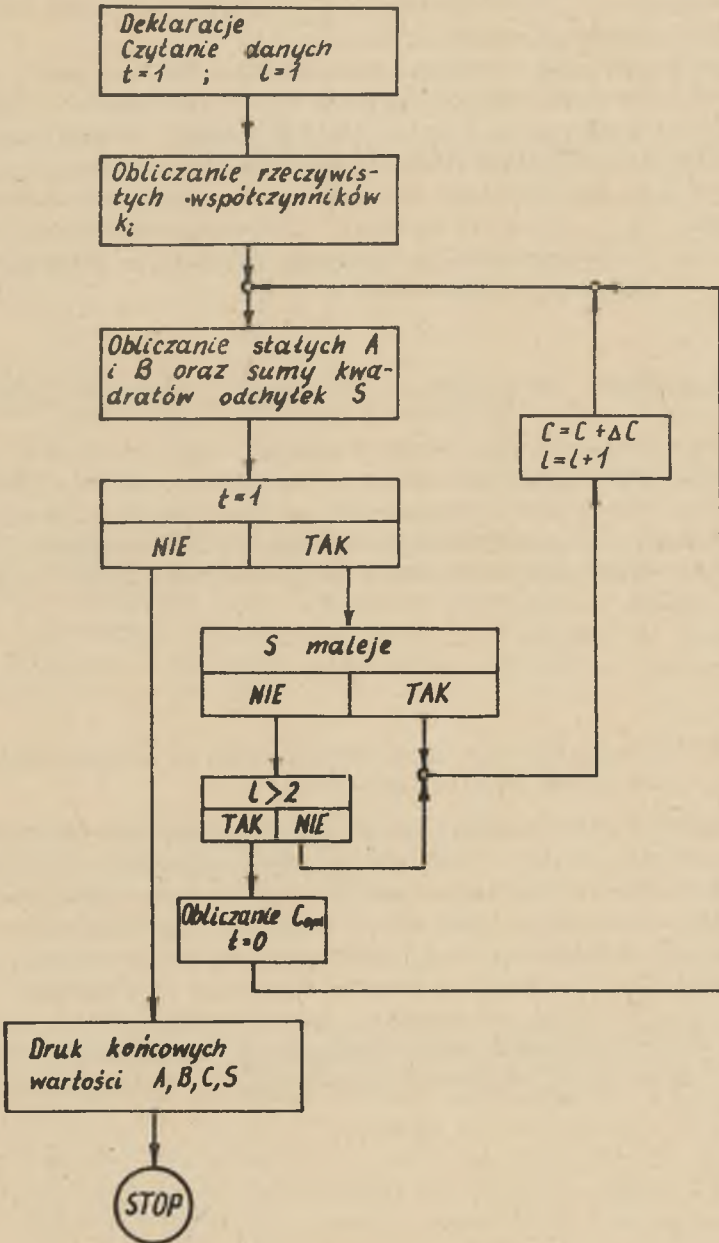
Rys. 1. Orientacyjna zależność $S = S(C)$

Mając:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= S_1(C_1) \\ S_2 &= S_2(C_2) = S_2(C_1 + \Delta C) \\ S_3 &= S_3(C_3) = S_3(C_1 + 2\Delta C) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

można obliczyć C_{opt} z zależności ważnej dla paraboli:

$$C_{opt} = C_3 - \frac{\Delta C(S_1 + 3S_3 - 4S_2)}{2(S_1 + S_3 - 2S_2)} \quad (11)$$



Rys. 2. Schemat blokowy obliczeń

Schemat blokowy programu wykonującego obliczenia według przedstawionej metody jest pokazany na rys. 2. Zmienna t jest wielkością sterującą, l jest ilością przeliczonych cykli. Aby móc wykorzystać zależność (11) l musi być większe od 2. Po znalezieniu C_{opt} zmienna sterująca t powoduje wydrukowanie końcowych wyników obliczeń.

Maszyna po obliczeniu rzeczywistych wartości współczynników przenikania ciepła k_1 odpowiadających czasom τ_1 oblicza stałe A i B w zależności (2) dla przyjętej niewielkiej wartości stałej C . Jeśli suma kwadratów odchyłek przejdzie przez wartość minimalną odpowiadającą C_{opt} i zacznie rosnąć oraz jeśli wykonano co najmniej trzy cykle obliczeniowe maszyna wyznacza C_{opt} i dla tej wartości C wykonuje końcowe obliczenie stałych A i B . W przeciwnym wypadku następuje obliczenie kolejnego cyklu dla wartości C większej od poprzedniej o ΔC .

5. Wyniki obliczeń

Zgodnie z podanym powyżej schematem wykonano obliczenia dla 13 rekuperatorów igłowych. Dane doświadczalne otrzymano z pomiarów wykonanych w kilku hutach. Okres pracy rekuperatorów pomiędzy kolejnymi remontami wynosił zależnie od rodzaju pieca 3÷8 miesięcy. Oprócz stałych A , B i C wyznaczono rzeczywisty średni współczynnik przenikania ciepła $k_{\text{śr}}$

$$k_{\text{śr}} = A + B \frac{1 - e^{-C\tau_p}}{C\tau_p} \quad (12)$$

Zależność (12) otrzymuje się po scałkowaniu wzoru (2) w granicach $0 \div \tau_p$, gdzie τ_p jest czasem pracy rekuperatora.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że rzeczywisty współczynnik przenikania ciepła waha się w dość dużych granicach w czasie pracy rekuperatora. Tym niemniej można zauważyć wyraźnie statystyczne zmniejszanie się k_1 w miarę upływu czasu, przy czym w większości wypadków punkty pomiarowe naniesione na wykres $k_1 = k_1(\tau)$ układają się wokół krzywej wykładniczej. Jest to potwierdzeniem słuszności wzoru (2). W przypadku $\tau \rightarrow \infty$ współczynnik $k_\infty = k(\tau \rightarrow \infty)$ jest mniejszy o ponad 40% od wartości początkowej $k_0 = k(\tau = 0)$. W przypadku cyklu trwającego 100 dni średnie wartości $k_{\text{śr}}$ są o ok. 17% mniejsze od wartości początkowej, zaś przy cyklu 250-dniowym o ok. 35%.

LITERATURA

1. SENKARA T.: Obliczenia pieców grzewczych w hutnictwie żelaza, 1968, Śląsk.
2. TIEBIEŃKOW B.P.: Rekuperatory dla promyszlennych piecziej, 1955, Moskwa.

Praca wpłynęła do Redakcji w listopadzie 1973 roku

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
ОТ ВРЕМЕНИ РАБОТЫ ДЛЯ ИГОЛЬЧАТЫХ РЕКУПЕРАТОРОВ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются изменения коэффициента теплопередачи в игольчатых рекуператорах в зависимости от времени работы. Принято функцию этой связи а далее показано способ определения постоянных опираясь на измерительных результатах. Эти измерения проведено и определено средние значения коэффициента теплопередачи для типичных промежутков времени работы рекуператора.

DETERMINATION DEPENDENCE OF THE HEAT
TRANSFER COEFFICIENT AS A FUNCTION OF THE
WORK TIME FOR THE NEEDLE RECUPERATORS

S u m m a r y

In the paper there has been considered the variation of the heat transfer coefficient in the needle recuperators as a function of the recuperator work time. It was assumed the function determining this relation and then there was shown the way of selection of the constants as a result of the measurements. Such measurements were made in the steel plants and on the base of them there were calculated the average values of the heat transfer coefficients for the typical periods of the recuperators work.