ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988
Seria: ENERGETYKA z. 96 Nr kol. 1004

Ryszard BARTNIK
Jan SKŁADZIEŃ

PORÓWNAWCZA ANALIZA CIEPLNA KONWEKCYJNYCH RÓWNOLEGŁOPRĄDOWYCH SPIRALNYCH PĘTLICOWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Streszczenie. Praca związana jest z analizą cieplną równoległoprądowego konwekcyjnego spiralnego pętlicowego wymiennika ciepła. Podano postać bezwymiarowych kryteriów i parametrów, w oparciu o które zrealizowano obliczenia porównawcze dla czterech charakterystycznych wariantów rozpatrywanego wymiennika. Warianty te różnią się kierunkiem przepływu strumieni czynnika znajdującego się na zewnątrz pętlicy.

Oznaczenia:

b - szerokość podziałowa pojedynczego kanału,

h - wysokość kanału,

k_{i-j} - współczynnik przenikania ciepła pomiędzy strumieniem i oraz j, $k_{i-j} = k_{j-i}$,

k_{i-j} - bezwymiarowy parametr kryterialny,

$$k_{i-j} = \frac{k_{i-j}\, b\, h}{W_i},$$

m - liczba elementów różnicowych pojedynczego kanału w obrębie kąta 2π (liczba całkowita podzielna przez 4),

n - liczba pełnych zwojów,

r - promień,

r_p - początkowy średni promień pierwszego zwoju,

t_i - temperatura i-tego strumienia,

T_i - bezwymiarowa temperatura i-tego strumienia,

$$T_i = \frac{t_i - t_{1d}}{t_{2d} - t_{1d}}, \quad l = 1 \quad \text{gdy} \quad |t_{2d} - t_{1d}| > |t_{2d} - t_{3d}|,$$

w przeciwnym przypadku $l = 3$,

$\dot{Q}$ - strumień ciepła,

W_i - pojemność cieplna i-tego strumienia; dodatnia, gdy strumień porusza się od wnętrza do powierzchni bocznej wymiennika, tzn. ma

prędkość o zwrocie zgodnym z kierunkiem narastania współrzędnej φ,

z - bezwymiarowa współrzędna położenia, $z = \frac{r}{4b}$,

φ - kąt, współrzędna położenia,

$)_{1,\ldots,4}$ - dotyczy strumienia 1,...,4; czynniki 1 i 3 znajdują się w kanałach pomiędzy pętlicą, strumienie 2 i 4 związane są z czynnikiem przepływającym wewnątrz pętlicy, przy czym strumień 2 porusza się od zewnątrz do środka wymiennika,

$)_d$ - przy dopływie,

$)_w$ - przy wypływie.

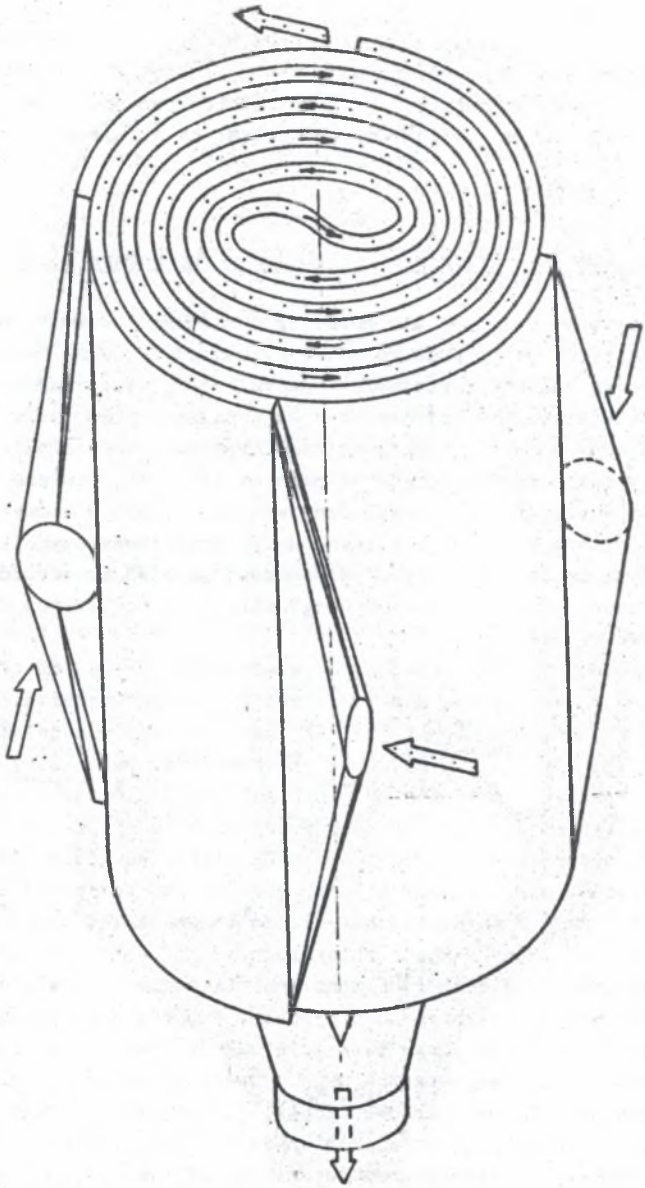
1. Wprowadzenie

Przedmiotem analizy w niniejszej pracy jest konwekcyjny spiralny pętlicowy wymiennik ciepła z równoległym przepływem czynników. Wymiennik ten charakteryzuje się istnieniem trzech niezależnych mediów, przy czym dwa z nich w praktyce związane są z taką samą substancją. Media robocze tworzą łącznie w wymienniku cztery strumienie czynników.

Wymiennik spiralny pętlicowy z punktu widzenia konstrukcyjnego należy do wymienników płytowych spiralnych. Ma on, podobnie jak i innego typu wymienniki spiralne [2], [5], [6], [10], wiele zalet, do których należą np. zwartość budowy oraz mała wrażliwość na zanieczyszczenia i dlatego jest wprowadzony do praktyki przemysłowej, mimo kłopotliwej technologii wykonania. Również przeprowadzenie obliczeń cieplnych dla tego typu wymiennika jest rzeczą złożoną, z drugiej natomiast strony brak modelu matematyczno-termodynamicznego oraz charakterystyk obliczeniowych stanowi dodatkową barierę w rozpowszechnianiu tego typu wymienników. Uzasadnia to celowość prowadzenia badań teoretycznych nad wymiennikiem spiralnym pętlicowym.

2. Opis równoległoprądowego spiralnego pętlicowego wymiennika ciepła

Konwekcyjny spiralny pętlicowy wymiennik ciepła przedstawiono w sposób poglądowy na rys. 1. W wymienniku tym jeden z czynników przepływa w sposób pętlicowy, dopływając i wypływając po zewnętrznej stronie wymiennika. Pozostałe dwa niezależne strumienie, tego samego na ogół w praktyce czynnika, mogą dopływać od zewnątrz lub od wewnątrz. Istnieją zatem cztery możliwe warianty, z uwagi na kierunki przepływu mediów, które pokazano na rys. 2. Na rysunku tym występują schematy wymienników modelowych, różniących się nieco od wymiennika rzeczywistego. Różnice te jednak albo nie mają wpływu na wyniki obliczeń cieplnych, albo też można je uwzględnić przez korektę wielkości występujących w modelu matematycznym wymienników modelowych. Główna różnica pomiędzy wymiennikiem rzeczywistym i modelowym polega na zastąpieniu



Rys. 1. Ogólny widok spiralnego pętlicowego wymiennika ciepła z równoległym przepływem czynników

Fig. 1. General view of the spiral-loop convective recuperator with parallel flow of factors

rzeczywistego kształtu pętlicy w pobliżu nawrotu odcinkiem prostym oraz na niewielkiej zmianie w usytuowaniu miejsc dopływu lub odpływu strumieni po stronie zewnętrznej.

Z punktu widzenia praktycznego najkorzystniejszy jest wariant a, w którym wszystkie miejsca dopływu znajdują się po zewnętrznej stronie wymiennika. Celem pracy jest zbadanie, jaka jest różnica pomiędzy tym oraz pozostałymi charakterystycznymi wariantami ze względu na strumień przekazywanego ciepła.

3. Opis modelu matematycznego spiralnego rekuperatora pętlicowego

Przy wykonywaniu obliczeń dla równoległoprądowego konwekcyjnego spiralnego wymiennika pętlicowego posłużono się metodą numeryczną. Metody analityczne [3], [7] mogą znaleźć zastosowanie jedynie przy wykonywaniu obliczeń cieplnych dla wymienników spiralnych o najprostszej postaci. Szczegółowy opis wykorzystanej metody, która jest rozwinięciem metody stosowanej przy analizie klasycznych rekuperatorów spiralnych [7], [8], zawiera praca [11]. Przedstawiono w niej model matematyczny wymiany ciepła w konwekcyjnym rekuperatorze spiralnym pętlicowym z równoległym przepływem czynników. Model ten ma dość złożoną postać mimo użycia stosunkowo prostej metody różnicowej. W pracy [11] podano również sposób uwzględniania rzeczywistej formy powierzchni przepływu ciepła.

W celu dokonania analizy cieplnej wymiennik podzielono na trzy strefy: środkową, główną zawierającą n pełnych zwojów oraz zewnętrzną. Pełny zwój ma szerokość 4b, przy czym przyjęto taką samą szerokość podziałową każdego kanału, jak ma to miejsce w wymienniku rzeczywistym. Opracowany model umożliwia jednak wykonanie obliczeń przy pominięciu tego założenia, umożliwia też uwzględnienie zmienności współczynników przenikania ciepła, pojemności cieplnych strumieni oraz wymiany ciepła z otoczeniem. Równania różnicowe można otrzymać z równań różniczkowych bilansu energii lub też przez sporządzenie różnicowych bilansów elementarnych. Bilanse takie są jednak konieczne przy rozpatrywaniu wewnętrznych komór zbiorczych.

Układ równań wynikających z bilansu energii zawiera niewiadome w postaci temperatury strumieni w wybranych miejscach. Temperatura ta jest funkcją kąta φ oraz numeru zwoju. Przy tworzeniu układu równań zastosowano odpowiednik ilorazu różnicowego centralnego z uwagi na kąt φ. Przyjęto stan ustalony, brak wewnętrznych źródeł ciepła, jednowymiarowy przepływ ciepła przez przegrody, niewystępowanie promieniowania oraz znikomy wpływ zmian energii potencjalnej i kinetycznej czynników. Otrzymano liniowy układ równań, których liczba, a więc i liczba niewiadomych, wynosiła od kilkuset do kilku tysięcy. Liczba ta była określona sumą $4\,mn + 4{,}5\,m + 4$, przy czym na podstawie wyników obliczeń wstępnych przyjmowano $m = 20$. Wykorzystanie mniejszej liczby elementów różnicowych powodowało powstawanie widocznego

błędu. Zastosowanie podziału na drobniejsze elementy różnicowe implikowało z kolei znikomą poprawę dokładności obliczeń, wzrastał natomiast znacząco czas ich trwania.

Liczba równań tworzących układ, jak również fakt występowania dużej liczby zerowych współczynników macierzy głównej, spowodowały zastosowanie do rozwiązania układu metody iteracyjnej Gaussa-Seidla [4]. Obliczenia ulegały każdorazowo zakończeniu wówczas, gdy maksymalna bezwzględna wartość różnicy pomiędzy odpowiednimi temperaturami w kolejnych przybliżeniach była mniejsza od założonej wartości. Po zakończeniu iteracji ulegał sprawdzeniu bilans energii. Gdy bilans ten nie był dokładnie spełniony, wówczas zmiany temperatury czynników były korygowane proporcjonalnie do bezwzględnych wartości pojemności cieplnych ich strumieni.

Przykładowe obliczenia wykonane dla wodnej chłodnicy kwasu siarkowego, płynącego wewnątrz pętlicy, potwierdziły przydatność modelu oraz przyjętej procedury numerycznej [11]. Okazało się również, że wymiana ciepła z otoczeniem ma w praktyce znikome znaczenie i można ją w rozważaniach cieplnych pominąć.

4. Zmienne i parametry bezwymiarowe

Wielkością charakteryzującą efekt działania wymiennika spiralnego pętlicowego [1] jest temperatura przy wypływie czynnika płynącego wewnątrz pętlicy t_{4w}. Znajomość tej temperatury umożliwia określenie efektu działania wymiennika, tzn. strumienia przekazywanego ciepła. Przy założeniu stałości pojemności cieplnych i współczynników przenikania ciepła, po pominięciu wpływu rzeczywistego kształtu środkowej części wymiennika, tj. po przyjęciu układu jak dla przypadków modelowych oraz po zaniedbaniu wymiany ciepła z otoczeniem, temperatura t_{4w} jest funkcją 15 parametrów:

$$t_{4w} = t_{4w}(t_{1d}, t_{2d}, t_{3d}, W_1, W_2, W_3, W_4, k_{1-2}, k_{2-3}, k_{3-4}, k_{4-1}, r_p, b, h, n). \qquad (1)$$

Powierzchnia przepływu ciepła nie jest zmienną niezależną i dla wymiennika modelowego określa ją wzór:

$$F = b\,h\left[(8n\pi + 9\pi + 4)\frac{r_p}{b} + 16\,n^2\pi + 16n\pi - 2{,}5\pi - 10\right]. \qquad (2)$$

Relacja powyższa ma charakter przybliżony, gdyż odcinki linii spiralnej są traktowane jako łuki okręgów. Błąd stąd wynikający nie przekracza jednak w praktyce 1%, a na ogół jest kilkakrotnie mniejszy od tej wartości.

Analiza układu równań różnicowych wykazała, zgodnie z postulatami teorii podobieństwa, że bezwymiarowa temperatura T_{4w} zależy w rozpatrywanym przy-

padku od 10 parametrów bezwymiarowych, które w pewnym stopniu można dobierać dowolnie, np.:

$$T_{4w} = T_{4w}\left(T_{jd}, K_{4-1}, \frac{W_2}{W_1}, \frac{W_3}{W_1}, \frac{W_4}{W_1}, \frac{k_{2-3}}{k_{1-2}}, \frac{k_{3-4}}{k_{1-2}}, \frac{k_{4-1}}{k_{1-2}}, \frac{r_p}{b}, n\right), \tag{3}$$

gdzie $j = 1 \cup 3$ i $j \neq 1$. Rozkład bezwzględnej temperatury strumieni wzdłuz drogi przepływu jest ponadto funkcją zmiennej z i numeru zwoju.

Dla typowego przypadku w praktyce zachodzi, bez względu na rozpatrywany wariant:

$$T_{1d} = T_{3d} = 0, \quad |W_1| = |W_3|, \quad |W_2| = |W_4|, \quad k_{1-2}=k_{2-3}=k_{3-4}=k_{4-1} \tag{4}$$

i wówczas temperatura T_{4w} jest dla danego wariantu wymiennika funkcją jedynie 4 parametrów:

$$T_{4w} = T_{4w}\left(K_{4-1}, \frac{W_2}{W_1}, \frac{r_p}{b}, n\right). \tag{5}$$

Strumień ciepła przekazywanego w wymienniku określa wzór:

$$\dot{Q} = |W_2|(1-T_{4w})(t_{2d} - t_{1d}) = |W_1|(T_{1w} + T_{3w})(t_{2d} - t_{1d}). \tag{6}$$

5. Wyniki obliczeń, wnioski

W celu zbadania, jaka jest różnica pomiędzy efektem cieplnym pracy wymiennika spiralnego pętlicowego dla czterech wariantów przepływu czynników, wykonano obliczenia przy użyciu zmiennych bezwymiarowych. Przyjęto takie same wartości bezwzględne parametrów bezwymiarowych, które jednak różnią się w pewnych przypadkach znakami. Wynika to z różnych znaków pojemności cieplnych strumieni:

wariant a: $W_1 < 0$, $W_2 < 0$, $W_3 < 0$, $W_4 > 0$,
wariant b: $W_1 > 0$, $W_2 < 0$, $W_3 > 0$, $W_4 > 0$,
wariant c: $W_1 > 0$, $W_2 < 0$, $W_3 < 0$, $W_4 > 0$,
wariant d: $W_1 < 0$, $W_2 < 0$, $W_3 > 0$, $W_4 > 0$.

Rezultaty obliczeń przedstawiono na rysunkach 3 ÷ 6 oraz 7. Na rysunkach 3 ÷ 6 podano zmienność bezwymiarowej temperatury przy wypływie T_{4w} i T_{1w} w funkcji bezwymiarowego parametru kryterialnego K_{4-1}. Założono, że obowią-

zują relacje (4) oraz że nie występuje wymiana ciepła z otoczeniem. W tej sytuacji temperatura przy wypływie T_{3w} wynika z oczywistej zależności:

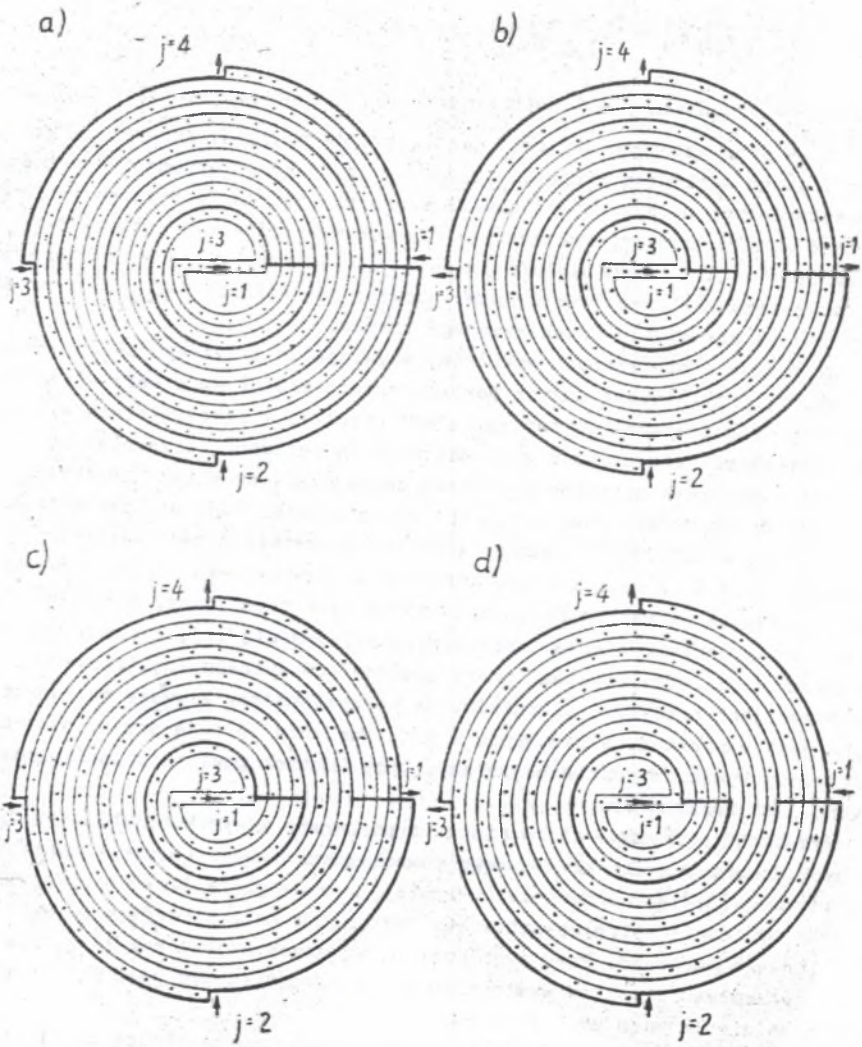
$$T_{3w} = \left|\frac{W_2}{W_1}\right| (1 - T_{4w}) - T_{1w}. \tag{7}$$

Wykresy na rysunkach 3 ÷ 6 dotyczą ustalonych typowych wartości stosunków $\left|\frac{W_1}{W_2}\right|$ i $\frac{r_p}{b}$ oraz czterech wartości liczby zwojów n. Każdy rysunek związany jest z innym wariantem kierunku przepływu czynników. Porównanie wartości przedstawionych na rys. 3 ÷ 6 zamieszczono na rysunku 7. Rysunek ten podaje wartość spadku temperatury czynnika płynącego w spiralnej pętlicy $1-T_{4w}$ w zależności od parametru kryterialnego K_{4-1}. Parametr ten jest proporcjonalny do powierzchni przepływu ciepła, podczas gdy różnica $1-T_{4w}$ jest proporcjonalna do strumienia przekazywanego ciepła.

Jak wynika z otrzymanych wykresów, a zwłaszcza z wykresu przedstawionego na rys. 7, przy niezbyt dużych powierzchniach przepływu ciepła wszystkie warianty dają praktycznie ten sam efekt cieplny. W rzeczywistych wymiennikach spiralnych nie stosuje się znacznych powierzchni ogrzewalnych, zaś rzeczywisty wymiennik spiralno-pętlicowy, zaprojektowany przez MONTOKWAS i przeznaczony do chłodzenia kwasu siarkowego, charakteryzuje się parametrami: $n = 2$, $K_{4-1} = 5{,}96 \cdot 10^{-4}$. Obszar, w którym wszystkie cztery warianty przedstawione na rys. 2 dają ten sam strumień przekazywanego ciepła, obejmuje zatem w zasadzie wszystkie przypadki mające sens techniczny. Dla dużych powierzchni przepływu ciepła, określonych zależnością (2), zaczyna być widoczna różnica pomiędzy efektami pracy wymienników spiralno-pętlicowych o różnych wersjach przepływu czynników. Najkorzystniejszy z uwagi na aspekty cieplne jest wariant d, a następnie a i b. Warianty te dają przy tym niemal identyczny wynik. Wyraźnie najgorszy, przy dużych powierzchniach ogrzewalnych, jest wariant c.

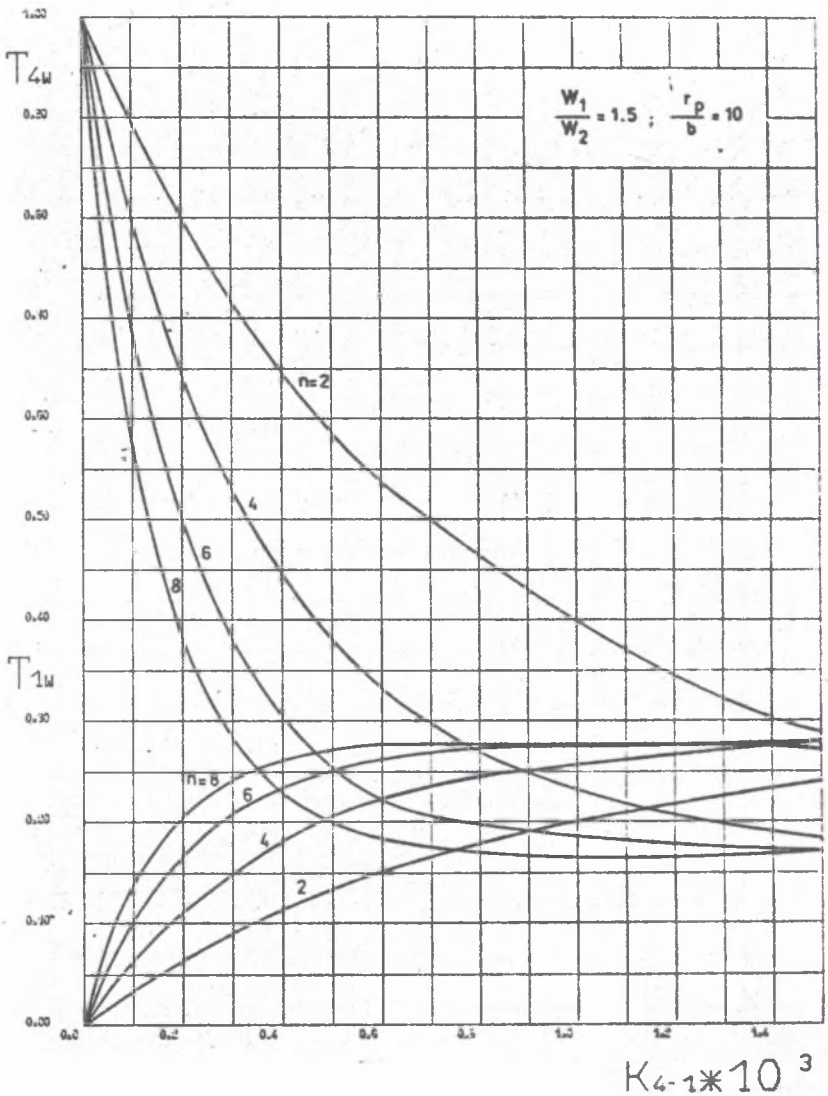
Rezultaty otrzymane dla wariantu a porównano z wynikami obliczeń cieplnych dokonanych dla klasycznego równoległoprądowego rurowego wymiennika pętlicowego [9], [11]. Porównanie wykazało, że z uwagi na ilość przekazywanego ciepła wymiennik spiralno-pętlicowy jest nieco korzystniejszy od wymiennika pętlicowego rurowego. Przy tych samych, mających praktyczny sens, powierzchniach przepływu ciepła w wymienniku spiralno-pętlicowym jest przekazywany strumień ciepła większy o 2% ÷ 8%.

Na rys. 7. fragmenty części krzywych zaznaczono za pomocą linii przerywanych. Linie te obejmują zakres, w którym powiększenie powierzchni grzejnej wymiennika powoduje spadek ilości ciepła oddawanego przez czynnik grzejący. Efekt ten, znany również dla innych typów wymienników, np. dla rekuperatorów krzyżowoprądowo-współprądowych [12], jest wyraźnie widoczny przy większej liczbie zwojów na rysunkach 3 ÷ 6.

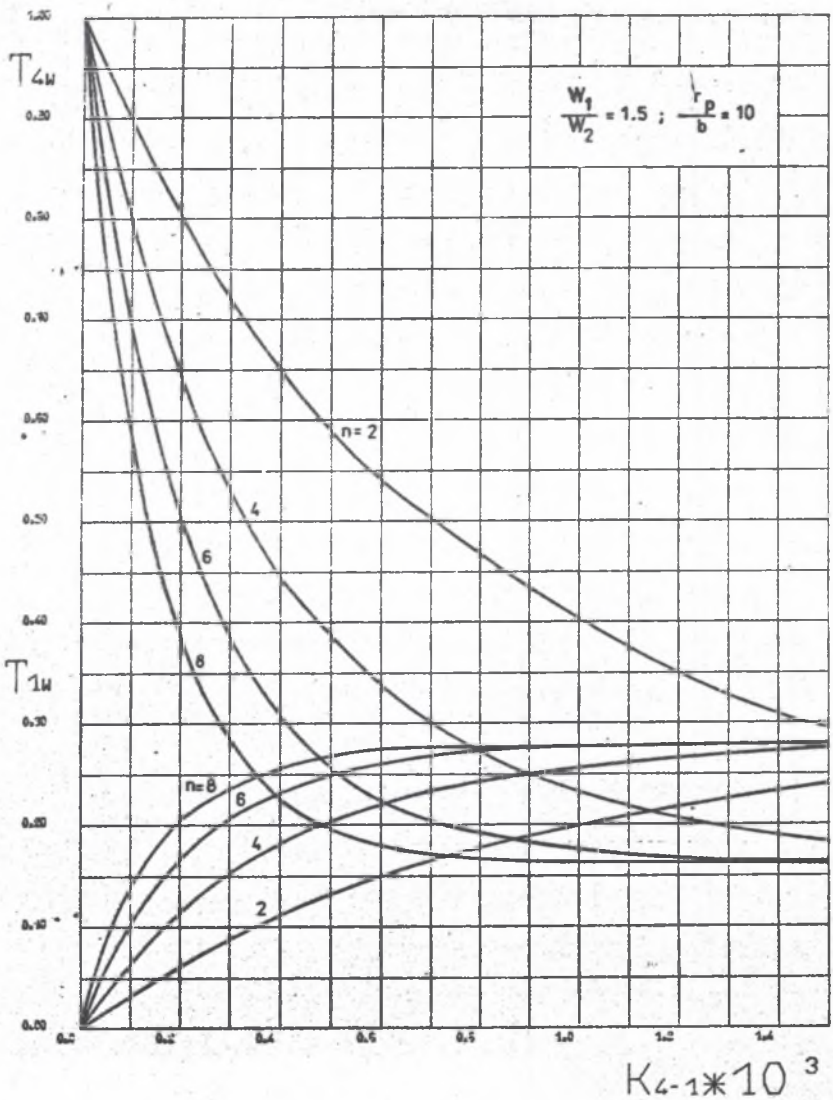


Rys. 2. Charakterystyczne warianty modelowego spiralnego pętlicowego równoległoprądowego wymiennika ciepła (j-numer strumienia)

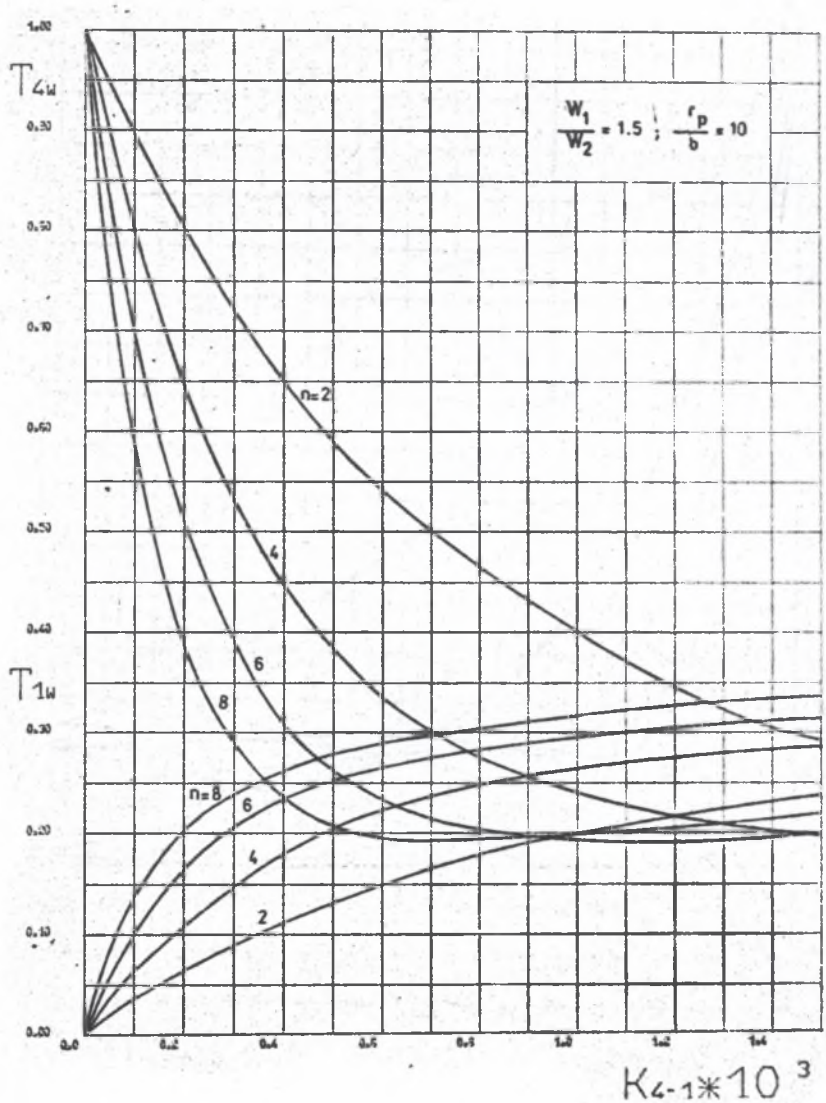
Fig. 2. Characteristic model variant of the spiral-loop convective recuperator (j-number of stream)



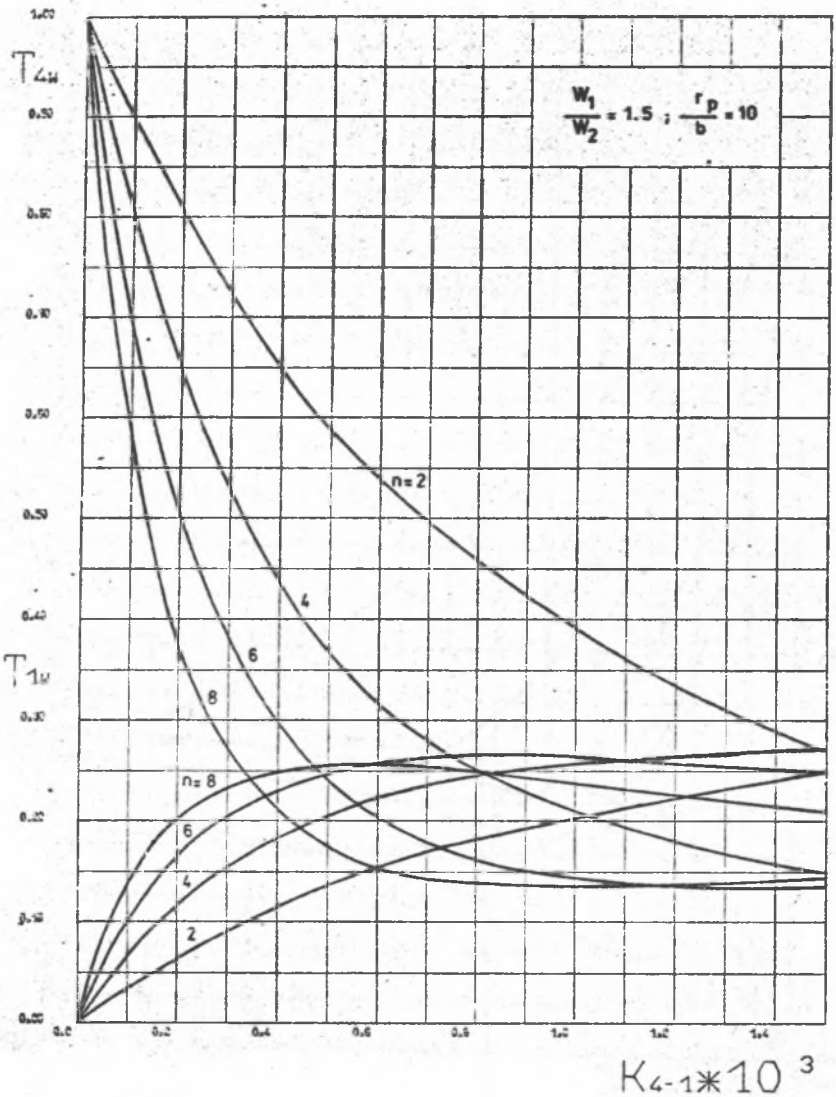
Rys. 3. Bezwymiarowe temperatury przy wypływie dla wariantu a
Fig. 3. Nondimensional temperatures in the outflow for wariant a



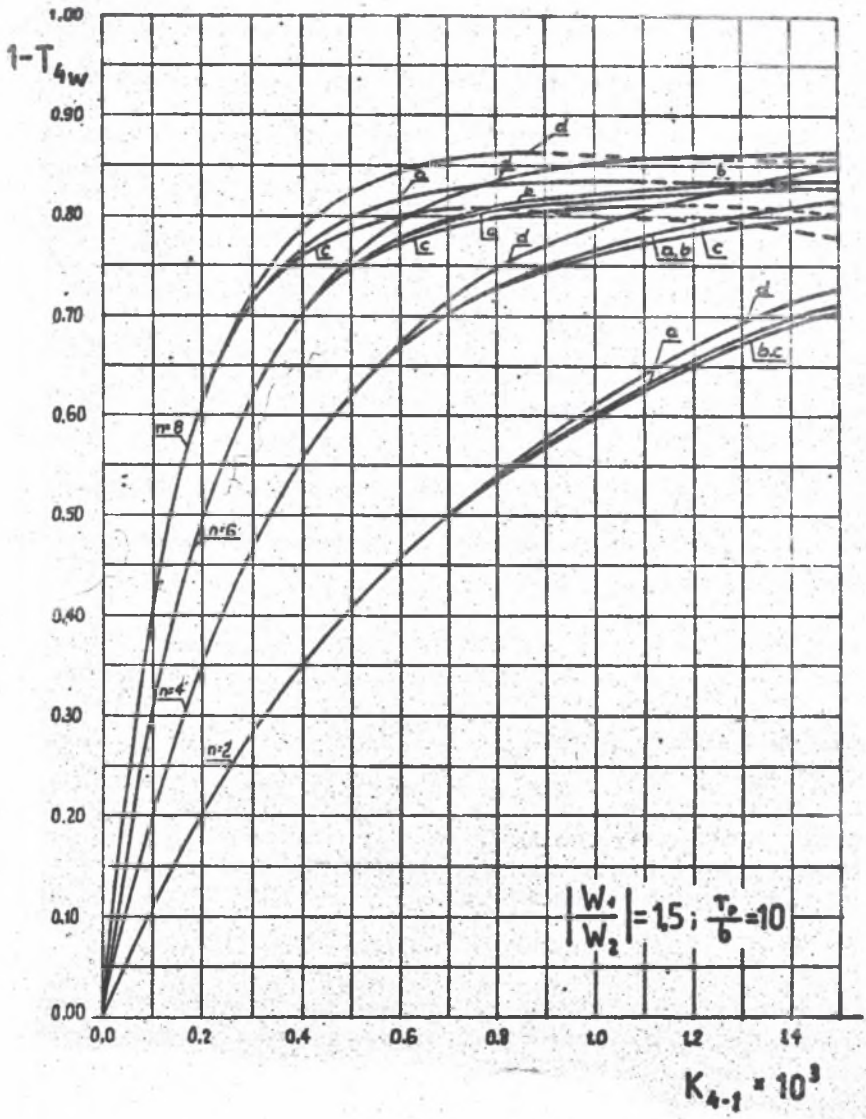
Rys. 4. Bezwymiarowe temperatury przy wypływie dla wariantu b
Fig. 4. Nondimensional temperatures in the outflow for variant b



Rys. 5. Bezwymiarowe temperatury przy wypływie dla wariantu c
Fig. 5. Kondimensional temperatures in the outflow for variant c



Rys. 6. Bezwymiarowe temperatury przy wypływie dla wariantu d
Fig. 6. Nondimensional temperatures in the outflow for variant d



Rys. 7. Porównanie spadków temperatury czynnika grzejącego dla czterech wariantów kierunków przepływu

Fig. 7. Comparison of temperature gradients of the heating factor for four variants of the flow directions

LITERATURA

[1] Bartnik R., Składzień J.: Bezwymiarowa analiza cieplna spiralnego pętlicowego wymiennika ciepła. Referaty Sympozjum Wymiany Masy i Ciepła, Warszawa-Jabłonna 1986.

[2] Chisholm D. i inni: Developments in Heat Exchanger Technology-1, Applied Science Publishers LTD, Londyn 1980.

[3] Cieśliński P.: Rekuperator spiralny - metoda obliczeń cieplnych, Materiały XII Zjazdu Termodynamików, Kraków-Rytro 1984.

[4] Croft D.R., Lilley D.G.: Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations, Applied Science Publishers LTD, Londyn 1977.

[5] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT, Warszawa 1979.

[6] Kakac S., Bergles R.E., Mayinger F.: Heat Exchangers, Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design, Mc Graw-Hill Book Company, Istambuł 1980.

[7] Madejski J.: Teoria wymiany ciepła, PWN, Warszawa 1963.

[8] Nowak W.: Obliczenia rekuperatorów z uwzględnieniem strat do otoczenia, Zesz. Nauk. Pol. Szczecińskiej nr 114, Szczecin 1969.

[9] Około-Kułak W.: Teoria rekuperatora pętlicowego, Zesz. Nauk. Pol. Śl. s. Energetyka z. 31, 1969.

[10] Pikoń J.: Aparatura chemiczna, PWN, Warszawa 1983.

[11] Składzień J., Bartnik R.: Model matematyczny spiralnego pętlicowego wymiennika ciepła, Archiwum Termodynamiki 1, 1986.

[12] Składzień J.: Zależność bezwymiarowej temperatury podgrzania od bezwymiarowej powierzchni grzejnej dla najczęściej stosowanych typów rekuperatorów konwekcyjnych, Hutnik 10, 1974.

Recenzent:
doc. dr hab. inż. Leon Troniewski

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 198[illegible]

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
КОНВЕКЦИОННЫХ СПИРАЛЕОБРАЗНЫХ ПЕТЛЕВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В работе приведён безразмерный сравнительный термодинамический анализ четырёх вариантов конвекционных спиралеобразных петлевых теплообменников с параллельными потоками теплоносителей. Поданы безразмерные параметры и критерия подобия. Рассуждения проиллюстрированы числовыми примерами.

COMPARATIVE THERMAL ANALYSIS OF CONVECTIVE SPIRAL-LOOP HEAT EXCHANGERS WITH PARALLEL FLOW

S u m m a r y

In the paper a comparative nondimensional thermal analysis of some spiral-loop convective recuperators is presented. Mediums flow has a parallel character. There are four characteristic versions according to the directions of the flow. The nondimensional parameters for the analysed spiral-loop recuperators as well as some results of the comparative thermal calculations for the characteristic four versions are also shown.