

Matematyczne modelowanie wielostopniowych wymienników ciepła

Henryk Otwinowski, Dariusz Urbaniak

Politechnika Częstochowska, Katedra Kotłów i Termodynamiki

Evgenij V. Baročkin, Vladimir P. Žukov

Ivanovo State Power University, Department of Applied Mathematics

Wymienniki ciepła znajdują szerokie zastosowanie we wszystkich praktycznie gałęziach przemysłu: w energetyce jako elementy pomocnicze w siłowniach ciepłych, w hutnictwie jako regeneratory pieców, w instalacjach chemicznych, petrochemicznych jak również w innych branżach pokrewnych.

Wymienniki ciepła są to urządzenia przeznaczone do wymiany ciepła pomiędzy dwoma płynnymi czynnikami, działające ze zmianą lub bez zmiany stanu skupienia płynów. Wyróżnia się dwa główne rodzaje wymienników:

- przeponowe (rekuperatory): oba czynniki oddzielone ścianką płyną w sposób ciągły, ustalony przepływ ciepła odbywa się przez wnikanie, temperatury nie zmieniają się w czasie;
- bezprzeponowe (regeneratory): różne nośniki ciepła na przemian stykają się z tą samą powierzchnią ogrzewalną; w większości są to urządzenia o działaniu okresowym, przepływ ciepła jest niestabilny, a temperatury zmienne w czasie.

Ze względu na kierunek przepływu czynników wymienniki przeponowe dzieli się na:

- przeciwprądowe,
- współprądowe,
- mieszane (np. prąd krzyżowy, spiralny).

Według sposobu realizacji procesu wymiany czynników w czasie wyróżnia się następujące rodzaje wymienników ciepła:

- o stałym strumieniu masy (intensywne technologie ciągłe – w przemysłach: energetycznym, hutniczym, petrochemicznym, gazowniczym, chemicznym, papierniczym, cukrowniczym, mleczarskim),
- o zmiennym strumieniu masy (realizacja procesu jednorazowego – przemysł farmaceutyczny i spożywczy),

- o zmiennym strumieniu masy i o zmiennym kierunku przepływu strumienia (regeneratory: w hutnictwie do podgrzewania powietrza do wysokich temperatur – do 1600 K, adsorbery, wymienniki jonowe).

Z konstrukcją związany jest następujący podział wymienników ciepła:

- rurowe: rura w rurze, płaszczowo-rurowe, spiralno-rurowe, rurowo-spiralne;
- płytowe: koszowe, spiralne, lamelowe;
- regeneratory: rotacyjno-dyskowe, bębnowe, nieruchome.

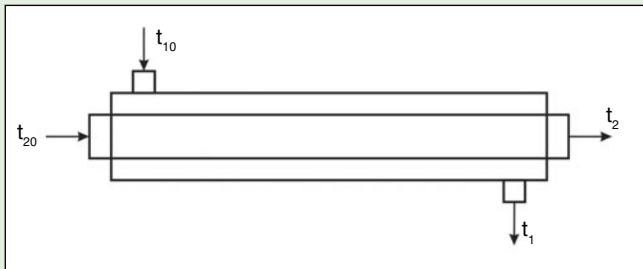
W podziale na zastosowanie wyróżnia się następujące wymienniki: podgrzewacze, chłodnice, kondensatory (bezprzeponowe i przeponowe), parowacze, zamrażarki.

Ocena cieplnej lub ekonomicznej efektywności urządzeń energetycznych występujących w przemyśle chemicznym, energetycznym, spożywczym lub ciepłownictwie według wybranej funkcji celu stanowi ważną i aktualną tematykę prac badawczych i teoretycznych [1–5].

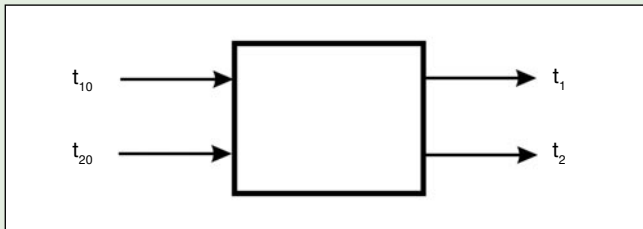
W artykule przedstawiono metodykę obliczeń wielostopniowych podgrzewaczy, która umożliwia projektowanie i analizę urządzeń energetycznych o dowolnej konfiguracji.

Model matematyczny wymiennika

Każdy powierzchniowy, przeponowy (np. rurowy) wymiennik ciepła (albo jego stopień) stanowi czterobiegunowy element o dwóch wchodzących i dwóch wychodzących strumieniach (rys. 1, 2).



Rys. 1. Schemat przepływowego rurowego wymiennika ciepła



Rys. 2. Schemat czterobiegunowego elementu cieplnego

Strumień ciepła $d\dot{q}$ przekazywanego od czynnika cieplejszego do czynnika chłodniejszego można wyrazić za pomocą równania Pecleta

$$d\dot{q} = k dF(t_1 - t_2) \quad (1)$$

$$dF = L dx \quad (2)$$

gdzie:

- k – współczynnik przenikania ciepła, W/m^2K ;
- dF – elementarna powierzchnia wymiany ciepła, m^2 ;
- L – szerokość całkowita powierzchni ogrzewalnej, m ;
- dx – elementarna długość wymiennika, m ;
- t_1 – temperatura czynnika cieplejszego, K ;
- t_2 – temperatura czynnika chłodniejszego, K ;
- q – gęstość strumienia ciepła, W/m^2 .

Bilans energii czynników – cieplejszego i chłodniejszego – przyjmuje następującą postać:

$$c_1 \dot{m}_1 t_1 = d\dot{q} + c_1 \dot{m}_1 (t_1 + dt_1) \quad (3)$$

$$c_2 \dot{m}_2 t_2 = -d\dot{q} + c_2 \dot{m}_2 (t_2 + dt_2) \quad (4)$$

gdzie:

- c – ciepło właściwe, J/kgK ,
- \dot{m} – strumień masy, kg/s ,
- indeks 1 dotyczy czynnika cieplejszego, a indeks 2 – chłodniejszego.

Po przekształceniu równań (3) i (4) otrzymuje się równania zmiany temperatury czynników cieplejszego i chłodniejszego wzdłuż wymiennika:

$$\frac{dt_1}{dx} = -a_1(t_1 - t_2) \quad (5)$$

$$\frac{dt_2}{dx} = a_2(t_1 - t_2) \quad (6)$$

gdzie współczynniki a_1 i a_2 wyrażone są następującymi zależnościami:

$$a_1 = \frac{kL}{c_1 \dot{m}_1} \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{kL}{c_2 \dot{m}_2} \quad (8)$$

Równania (5) i (6) tworzą układ równań różniczkowych. Po wyznaczeniu temperatury t_2 z równania (5)

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{a_1} \frac{dt_1}{dx} \quad (9)$$

i podstawieniu do równania (6) otrzymuje się

$$\frac{d^2 t_1}{dx^2} + (a_1 + a_2) \frac{dt_1}{dx} = 0 \quad (10)$$

Równanie (10) jest jednorodnym równaniem różniczkowym liniowym rzędu drugiego. Jeżeli w tym równaniu zastosuje się podstawienie

$$t_1 = e^{rx} \quad (11)$$

skąd

$$\frac{dt_1}{dx} = r e^{rx} \quad (12)$$

$$\frac{d^2 t_1}{dx^2} = r^2 e^{rx} \quad (13)$$

to po podzieleniu przez e^{rx} otrzymuje się równanie charakterystyczne

$$r^2 + (a_1 + a_2)r = 0 \quad (14)$$

Równanie to ma dwa pierwiastki rzeczywiste:

$$r_1 = 0 \quad (15)$$

$$r_2 = -(a_1 + a_2) \quad (16)$$

Wynika stąd, że rozwiązanie równania różniczkowego podanego w (10) ma następującą postać ogólną

$$t_1 = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x} \quad (17)$$

a po podstawieniu wartości pierwiastków otrzymuje się temperaturę t_1

$$t_1 = C_1 + C_2 e^{-(a_1 + a_2)x} \quad (18)$$

oraz z równania (9) temperaturę t_2

$$t_2 = C_1 + C_2 \frac{a_2}{a_1} e^{-(a_1 + a_2)x} \quad (19)$$

Równania (18) i (19) stanowią rozwiązanie ogólne rozkładu temperatury obu czynników: cieplejszego i chłodniejszego dla przepływowego prostoliniowego wymiennika.

Po wstawieniu do równań (18) i (19) warunków początkowych:

$$x = 0; \quad t_1 = t_{10}; \quad t_2 = t_{20} \quad (20)$$

otrzymuje się wartości stałych C_1 i C_2 :

$$C_1 = \frac{t_{20} + t_{10} \frac{a_2}{a_1}}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \quad (21)$$

$$C_2 = \frac{t_{10} - t_{20}}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \quad (22)$$

Jeśli założy się, że oba czynniki są takie same i jednakowe są ich strumienie masy: $a_1 = a_2 = a$ z równań (21) i (22) można wyznaczyć stałe całkowania:

$$C_1 = \frac{t_{10} + t_{20}}{2} \quad (23)$$

$$C_2 = \frac{t_{10} - t_{20}}{2} \quad (24)$$

a równania temperatur (18) i (19) przyjmują następujące postaci:

$$t_1 = \frac{t_{10} + t_{20}}{2} + \frac{t_{10} - t_{20}}{2} e^{-2ax} \quad (25)$$

$$t_2 = \frac{t_{10} + t_{20}}{2} - \frac{t_{10} - t_{20}}{2} e^{-2ax} \quad (26)$$

$$\text{Dla } x = 0; t_1 = t_{10}; t_2 = t_{20} \text{ a dla } x \rightarrow \infty t_1 = t_2 = \frac{t_{10} + t_{20}}{2}.$$

Wartości stałych C_1 i C_2 , wyrażonych równaniami (21) i (22), podstawia się do zależności (18) i (19) na temperatury czynników t_1 i t_2 i otrzymuje się następujący układ równań liniowych:

$$\left[\frac{a_2}{a_1} + e^{-(a_1+a_2)x} \right] t_{10} + \left[1 - e^{-(a_1+a_2)x} \right] t_{20} - \left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) t_1 = 0 \quad (27)$$

$$\frac{a_2}{a_1} \left[1 - e^{-(a_1+a_2)x} \right] t_{10} + \left[1 + \frac{a_2}{a_1} e^{-(a_1+a_2)x} \right] t_{20} - \left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) t_2 = 0 \quad (28)$$

Powyższy układ równań można zapisać w postaci macierzowej

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

lub

$$\mathbf{BT} = \mathbf{0} \quad (30)$$

gdzie: \mathbf{B} – macierz współczynników, \mathbf{T} – macierz temperatur, $\mathbf{0}$ – macierz zerowa.

Współczynniki b_{ij} mają następujące wartości:

$$b_{11} = \frac{a_2}{a_1} + e^{-(a_1+a_2)x}, \quad b_{12} = 1 - e^{-(a_1+a_2)x}, \quad (31)$$

$$b_{13} = -\left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right), \quad b_{14} = 0$$

$$b_{21} = \frac{a_2}{a_1} \left[1 - e^{-(a_1+a_2)x} \right], \quad b_{22} = 1 + \frac{a_2}{a_1} e^{-(a_1+a_2)x},$$

$$b_{23} = 0, \quad b_{24} = -\left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) \quad (32)$$

Przy znanych dwóch temperaturach z układu równań (29) można wyznaczyć dwie pozostałe temperatury.

Powyższe rozważania dotyczą pojedynczego wymiennika ciepła, nie będącego elementem składowym układu wymienników.

W celu uogólnienia modelu na przypadek wymiennika, który wchodzi w skład układu wymienników (lub stanowi jeden ze stopni wymiennika wielostopniowego) układ równań (29) należy rozszerzyć o dodatkowe równania.

Jeśli założy się, że znane są wartości temperatury czynników na wejściu do układu wymienników układ równań (29) przyjmie następującą postać

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_{20} \end{bmatrix} \quad (33)$$

gdzie: $\tilde{t}_{10}, \tilde{t}_{20}$ – wartości temperatury czynnika cieplejszego i chłodniejszego na wejściu do układu wymienników (lub wymiennika wielostopniowego).

Współczynniki występujące w macierzy \mathbf{B} muszą być liniowo niezależne, aby układ równań (33) miał rozwiązanie. Położenie jedynki w macierzy współczynników \mathbf{B} odpowiada temu punktowi w wymienniku, w którym występuje znana temperatura. Dwa dodatkowe równania występujące w układzie równań (33) mają postać:

$$t_{10} = \tilde{t}_{10} \quad (34)$$

$$t_{20} = \tilde{t}_{20} \quad (35)$$

co jest zgodne z założeniem, że znane są temperatury na wejściu do wymiennika.

Rozpatrzmy układ, składający się z n wymienników ciepła, połączonych ze sobą w dowolny sposób. Każdy wymiennik ciepła stanowi czterobiegunowy element o dwóch strumieniach czynników wchodzących i dwóch strumieniach czynników wychodzących. Strumienie czynników przepływające pomiędzy wymiennikami nazwano strumieniami wewnętrznymi.

Przyjmuje się następujące założenia:

- do układu podawane są dwa zewnętrzne strumienie czynników o znanych temperaturach,
- układ opuszczają również dwa zewnętrzne strumienie czynników.

Dla każdego wymiennika stanowiącego element układu można napisać macierz współczynników, których wartości zależą od powierzchni wymiany ciepła, współczynnika przenikania ciepła, strumienia masy i ciepła właściwego czynnika

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} b_{11}^i & b_{12}^i & b_{13}^i & 0 \\ b_{21}^i & b_{22}^i & 0 & b_{24}^i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

gdzie indeks i oznacza numer wymiennika w układzie.

Ponieważ w układzie wymienników temperatury czynników wychodzących z danego wymiennika są jednocześnie temperaturami czynników wchodzących do następnego wymiennika dodatkowe równania (34) i (35) przyjmują następującą postać:

$$t_1 = \tilde{t}_{10} \quad (37)$$

$$t_2 = \tilde{t}_{20} \quad (38)$$

Z powyższych równań wynika położenie jedynek w macierzy (36) – inne niż w macierzy (33).

Czynnik opuszczający dany wymiennik może wpływać do dowolnego innego wymiennika układu. W celu określenia kierunku przepływu czynników: gorącego G, chłodnego C oraz mieszanych obu czynników GC wprowadza się następujące macierze:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\mathbf{GC} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

W macierzach (39)-(41) znak minus oznacza, że czynnik opuszcza rozpatrywany wymiennik. Cztery temperatury i -tego wymiennika tworzą macierz jednokolumnową o wymiarach 4×1

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} t_{10}^i \\ t_{20}^i \\ t_1^i \\ t_2^i \end{bmatrix} \quad (42)$$

Układ czterech równań liniowych (33) można zapisać dla każdego wymiennika układu. Otrzymuje się wtedy układ $4n$ równań liniowych, który po odpowiednich przekształceniach można przedstawić w postaci macierzowej

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \dots & A_{2n} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \dots & A_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & A_{n3} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{10} \\ T_{20} \\ T_{30} \\ \dots \\ T_{n0} \end{bmatrix} \quad (43)$$

lub

$$\mathbf{AT} = \mathbf{TO} \quad (44)$$

gdzie \mathbf{A} – macierz blokowa, określająca strukturę układu wymienników, w której każdy element o wymiarach 4×4 odpowiada jednej z macierzy (36), (39)–(41).

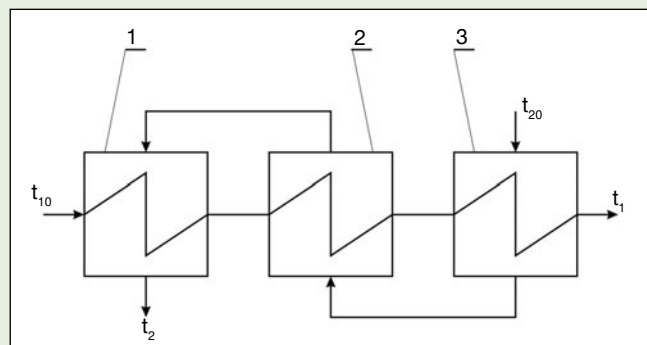
W celu obliczenia dowolnego układu składającego się z n wymienników wystarczy utworzyć macierz \mathbf{A} według następujących zasad.

1. Każdy wymiennik układu ma przyporządkowany numer $i \in (1, n)$.
2. W macierzy blokowej \mathbf{A} wymiennikowi numer i odpowiada i -ty wiersz. W każdym wierszu występują co najwyżej trzy bloki niezerowe.
3. Na głównej przekątnej macierzy \mathbf{A} umieszczone są macierze współczynników (36) czyli $\mathbf{A}_{ii} = \mathbf{B}_i$.
4. Jeśli gorący czynnik z i -tego wymiennika podawany jest do j -tego elementu to $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{G}$.
5. Jeśli chłodny czynnik z i -tego wymiennika podawany jest do j -tego elementu to $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{C}$.
6. Jeśli gorący i chłodny czynnik podawane są z i -tego do j -tego wymiennika to $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{GC}$.
7. Wszystkie pozostałe bloki macierzy \mathbf{A} są równe zerowym macierzom kwadratowym czwartego stopnia $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{0}$.
8. Jednokolumnowa macierz blokowa nieznanych temperatur \mathbf{T} zawiera n macierzy (42) lub $4n$ elementów, odpowiadających temperaturom czynników wewnątrz układu.
9. Niezerowe elementy jednokolumnowej macierzy \mathbf{TO} są równe znanym temperaturom strumieni zewnętrznych. W macierzy \mathbf{TO} numery wierszy, w których występują znane temperatury czynników zewnętrznych wejściowych odpowiadają numerom wierszy dla temperatur czynników zewnętrznych wyjściowych – zgodnie z (33). Przy wyjściu czynników z układu nie jest konieczne określanie kierunku dalszego przepływu i dlatego te wiersze można wykorzystać do wprowadzenia wartości temperatury czynników zewnętrznych wchodzących.

Wyniki obliczeń i podsumowanie

Opracowany model zastosowano do obliczeń trzystopniowego przeciwprądowego wymiennika ciepła, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.

Do obliczeń przyjęto parametry czynników i wymiennika odpowiadające rzeczywistemu aparatowi. Jest to podgrzewacz ciepłej wody użytkowej typu Tp-J-23,00. Zadaniem tego wymiennika jest podgrzew wody zimnej o temperaturze początkowej $\tilde{t}_{20} = 5^\circ\text{C}$ i strumieniu masy $\dot{m}_2 = 1,0121 \text{ kg/s}$. Czynnikiem grzejnym jest woda ciepła o temperaturze początkowej $\tilde{t}_{10} = 70^\circ\text{C}$ i strumieniu masy $\dot{m}_1 = 1,5762 \text{ kg/s}$. Ciepło właściwe czynnika cieplejszego wynosi $c_1 = 4,1950 \text{ kJ/kgK}$, a czynnika chłodniejszego $c_2 = 4,1973 \text{ kJ/kgK}$.



Rys. 3. Schemat trzystopniowego przeciwprądowego wymiennika ciepła

Powierzchnia ogrzewalna wymiennika składa się z 14 rurek mosiężnych o średnicy zewnętrznej 16 mm i grubości ścianki 1,5 mm, stąd całkowita szerokość powierzchni ogrzewalnej wynosi $L = 0,5715$ m.

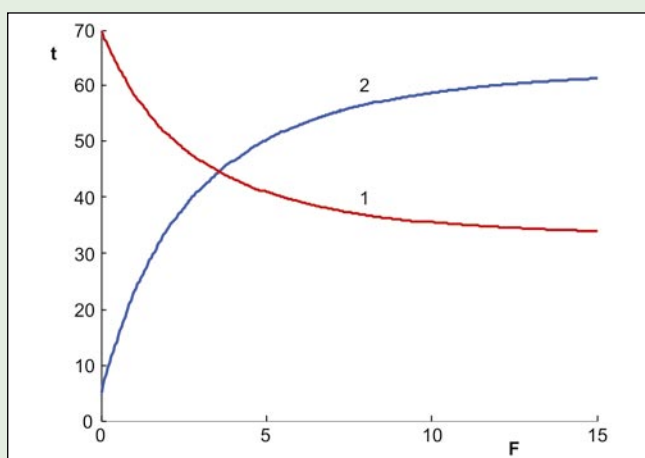
Obliczony dla tego wymiennika współczynnik przenikania ciepła wynosi $k = 0,8955$ kW/m²K. Stopnie wymiennika ponumerowane są w kierunku przepływu gorącego czynnika, który podawany jest do pierwszego stopnia, następnie przepływa do drugiego stopnia i opuszcza wymiennik po przejściu trzeciego stopnia.

Chłodny czynnik podawany jest do ostatniego stopnia, stamtąd przepływa do drugiego stopnia, a opuszcza wymiennik po przejściu pierwszego stopnia.

Zgodnie z podanymi zasadami macierz blokowa **A** utworzona dla wymiennika przeciwpłdowego przyjmuje następującą postać

$$A = \begin{bmatrix} B_1 & G & 0 \\ C & B_2 & G \\ 0 & C & B_3 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Rozwiązując układ równań (43) z uwzględnieniem równania (45) oblicza się temperatury czynników w dowolnym punkcie wymiennika.



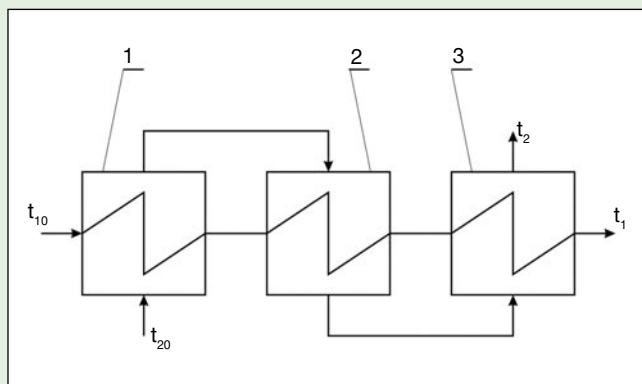
Rys. 4. Wykres zmian temperatury czynników w zależności od powierzchni wymiennika przeciwpłdowego
1 – czynnik gorący, 2 – czynnik chłodny

Na rysunku 4 przedstawiono wykres zmian temperatury obydwu czynników w zależności od powierzchni wymiany ciepła.

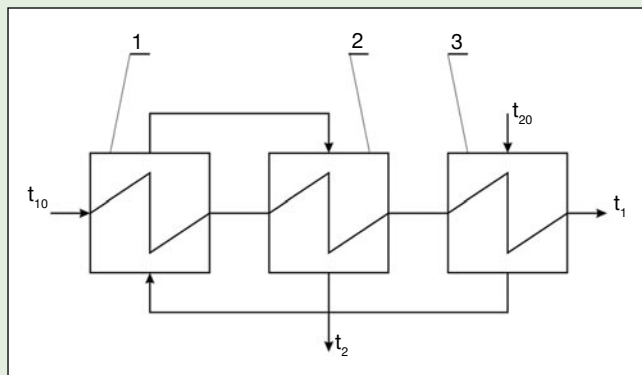
W projekcie wymiennika przeprowadzono szczegółowe obliczenia powierzchni ogrzewalnej dla zadanych temperatur początkowych i końcowych obydwu czynników. Dla temperatur wody zimnej 5/60°C oraz wody ciepłej 70/35°C obliczona powierzchnia wynosi 15 m².

Z wykresu przedstawionego na rysunku 4 wynika, że dla powierzchni $F = 15$ m² temperatury czynników są w przybliżeniu równe temperaturom końcowym założonym w obliczeniach projektowych. Na tej podstawie można wnioskować o poprawności opracowanego modelu.

W celu sprawdzenia modelu przeprowadzono również obliczenia dla innych typów wymienników trzystopniowych.



Rys. 5. Schemat trzystopniowego współpłdowego wymiennika ciepła



Rys. 6. Schemat trzystopniowego mieszanego wymiennika ciepła

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono schematy wymienników współpłdowego i mieszanego.

Podobnie jak poprzednio stopnie wymienników ponumerowane są w kierunku przepływu gorącego czynnika, który podawany jest do pierwszego stopnia, następnie przepływa do drugiego stopnia i opuszcza wymiennik po przejściu trzeciego stopnia. Przepływ czynnika chłodnego w wymienniku współpłdowym jest odwrotny niż w wymienniku przeciwpłdowym (rys. 5).

Chłodny czynnik w wymienniku mieszanym podawany jest do trzeciego stopnia, stamtąd przepływa do pierwszego stopnia, a opuszcza wymiennik po przejściu drugiego stopnia (rys. 6).

Dla powyższych wymienników przeprowadzono obliczenia zmian temperatury czynników. Przyjęto, że dane początkowe do obliczeń są takie same jak dla wymiennika przeciwpłdowego.

Macierz blokowa **A** utworzona dla wymiennika współpłdowego przyjmuje następującą postać

$$A = \begin{bmatrix} B_1 & GC & 0 \\ 0 & B_2 & GC \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix} \quad (46)$$

a dla wymiennika mieszanego

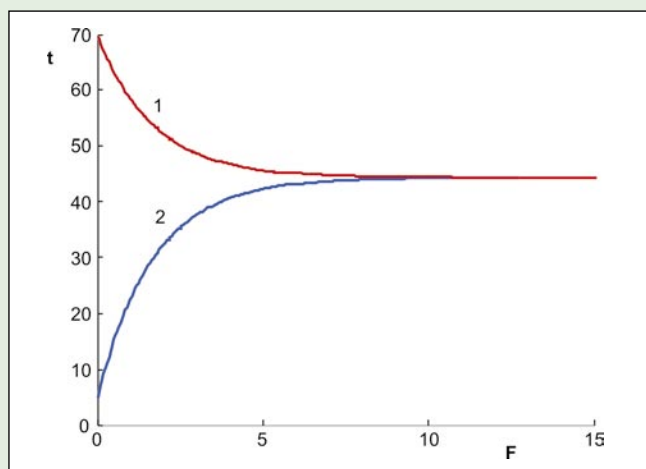
$$A = \begin{bmatrix} B_1 & GC & 0 \\ 0 & B_2 & G \\ C & 0 & B_3 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

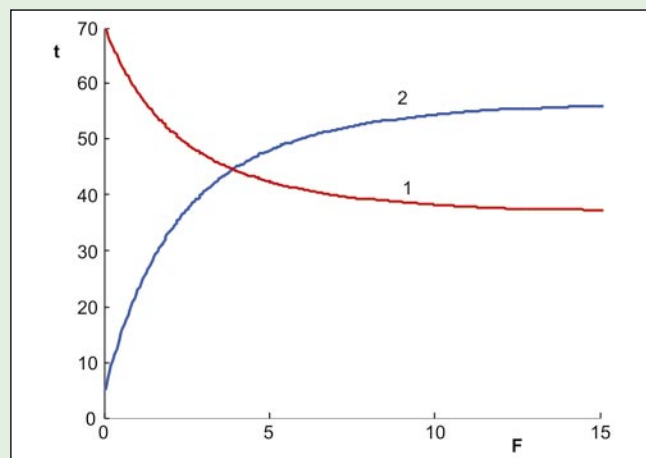
Z porównania wykresów zmiany temperatury czynników w zależności od powierzchni wymiany ciepła dla wszystkich rodzajów wymienników wynika oczywisty wniosek, że największą skutecznością ogrzewania charakteryzuje się wymiennik przeciwpądowy.

Pozostałe wymienniki nie umożliwiają osiągnięcia założonej temperatury czynnika chłodniejszego na wyjściu z wymiennika.

Przedstawiony model może być wykorzystany do analizy efektywności urządzeń cieplnych w energetyce, ciepłownictwie, przemyśle chemicznym lub spożywczym.



Rys. 7. Wykres zmian temperatury czynników w zależności od powierzchni wymiennika współprądowego
1 – czynnik gorący, 2 – czynnik chłodny



Rys. 8. Wykres zmian temperatury czynników w zależności od powierzchni wymiennika mieszane
1 – czynnik gorący, 2 – czynnik chłodny

LITERATURA

- [1] Nazmeev Yu.G., Lavygin V.M.: *Teploobmennye aparaty TES*. Moskwa, Energoatomizdat, 1998
- [2] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: *Wymiana ciepła*. WNT, Warszawa 2000
- [3] Zarzycki R.,: *Wymiana ciepła i ruch masy w inżynierii środowiska*. WNT, Warszawa 2005
- [4] Bielski S., Malinowski L. *Int Comm Heat Mass Tran*, 2005, vol.32, p.1034
- [5] Rennie T.J.; Raghavan V.G.S. *Appl Therm Eng*, 2006, vol. 26, p. 1266

Informacje o Autorach

Dr hab. inż. Henryk Otwinowski jest pracownikiem Katedry Kotłów i Termodynamiki na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej na stanowisku profesora. Studia ukończył w 1980 r. na Politechnice Częstochowskiej. W 1987 r. obronił pracę doktorską na Politechnice Wrocławskiej, a w 2004 r. uzyskał stopień dra hab. w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jest autorem i współautorem ponad 120 artykułów, 4 monografii i skryptów oraz 3 patentów. Od 1996 roku jest członkiem Komisji Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów PAN, Oddział w Katowicach. Jego zainteresowania naukowe dotyczą przede wszystkim przeróbki mechanicznej surowców mineralnych, termodynamiki, techniki cieplnej oraz ochrony środowiska w energetyce. e-mail: otwinowski@kkt.pcz.czyst.pl

Dr inż. Dariusz Urbaniak jest nauczycielem akademickim, adiunktem w Katedrze Kotłów i Termodynamiki Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej. Ukończył studia magisterskie na Wydziale Budowy Maszyn specjalności wytwarzanie pary i kotły w roku 1990, broniąc pracę dyplomową pt. „Fluidyzacja materiałów drobnoziarnistych w polu akustycznym”. W roku 2000 obronił pracę doktorską pt. Prognozowanie składu ziarnowego produktu rozdrobnienia strumieniowego monodispersyjnego materiału na Wydziale Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej. Jest autorem i współautorem ponad 50 publikacji naukowych. Zainteresowania badawcze to następujące dziedziny: rozdrabnianie, klasyfikacja, fizyka i chemia ciała stałego, termodynamika, kotły ciepłownicze i energetyczne.

Prof. dr hab. inż. Żukov Vladimir Pavlovič jest pracownikiem Katedry Matematyki Stosowanej Politechniki w Iwanowie (Rosja). Jest autorem i współautorem ponad 330 artykułów, 2 monografii oraz 19 patentów. Zainteresowania naukowe: modelowanie procesów mechanicznych i cieplnych zachodzących w układach mieląco-klasyfikujących i wymiennikach ciepła.

Doc. dr inż. Baročkin Evgenij Vital'evič jest pracownikiem Katedry Elektrowni Ciepłych w Iwanowie (Rosja, Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo Russia). Jest autorem i współautorem ponad 80 artykułów, 3 monografii oraz 6 patentów. Zainteresowania naukowe: wymiana ciepła, odgazowanie, optymalizacja obciążenia turbin w elektrowniach.