

BEATA NIEZGODA-ŻELASKO¹

WYMIENNIKI CIEPŁA ZASILANE ZAWIESINĄ LODOWĄ

ICE SLURRY-FED HEAT EXCHANGERS

Streszczenie

W pracy przedstawiono algorytm obliczeń cieplnych i przepływowych wymienników zasilanych zawiesiną lodową. W artykule zawarto porównanie wyników obliczeń cieplno-przepływowych chłodziń powietrza i cieczy, zasilanych glikolem lub zawiesiną lodową.

Słowa kluczowe: zawiesina lodowa, obliczenia cieplne i przepływowe, ciecz nienewtonowska

Abstract

The paper presents an algorithm of thermal and flow calculations for heat exchangers fed with ice slurry. It also aims to compare the results of thermal and flow calculations for air and fluid coolers fed with ice slurry and ethylene glycol water solution.

Keywords: ice slurry, thermal and flow calculations, non-Newtonian fluids

¹ dr hab. inż. Beata Niezgoda-Żelasko, prof. PK, Politechnika Krakowska

1. Obliczenia cieplne i przepływowe wymienników zasilanych zawiesiną lodową

Zawiesina lodowa należy do relatywnie nowych chłodziw i jest mieszaniną kryształków lodu oraz wody z dodatkiem środka obniżającego temperaturę krzepnięcia. Zyski ze stosowania zawiesiny lodowej wynikają zarówno z możliwości wykorzystania w procesie chłodzenia utajonego ciepła topnienia kryształków lodu, jak również dużych wartości współczynników przyjmowania ciepła zawiesiny lodowej. Skala korzyści ze stosowania zawiesiny lodowej uwarunkowana jest także rodzajem medium chłodzonego. Duża pojemność cieplna zawiesiny lodowej istotnie redukuje strumień masy chłodziwa. Natomiast powierzchnia wymiany ciepła wymiennika wynika z wartości współczynnika przenikania ciepła, który z kolei determinowany jest najmniejszą spośród wartości współczynników przyjmowania ciepła mediów wymieniających ciepło. Celem prezentowanej pracy jest przedstawienie algorytmu obliczeń cieplnych płytowych chłodnic cieczy i lamelowanych chłodziw powietrza, zasilanych zawiesiną lodową. W pracy przedstawiono porównanie wyników obliczeń cieplnych i przepływowych wymienników zasilanych zawiesiną lodową oraz wodnym roztworem glikolu etylenowego.

Obliczenia cieplne wymiennika zasilanego zawiesiną lodową wymagają zapisania równania Pecleta (1) dla wymiennika oraz równań bilansowych (2÷3) dla każdego z czynników. Układ równań (1-3) należy uzupełnić o równania (4÷5) pozwalające wyznaczyć wartość entalpii zawiesiny lodowej [1], równanie (6) określające zależność pomiędzy temperaturą zawiesiny, a stężeniem cieczy nośnej [1] oraz równanie (7) pozwalające wyznaczyć udział masowy lodu w stanie równowagi termodynamicznej.

$$\dot{Q} = k_A \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \dot{W} \cdot \Delta t_p \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{zl} \cdot \Delta i_{zl} \quad (3)$$

$$i_{zl} = \frac{x_s}{100} \cdot i_s + \left(1 - \frac{x_s}{100}\right) \cdot i_a = \frac{x_s}{100} \cdot (-r + t_{zl} \cdot c_{pa}) + \left(1 - \frac{x_s}{100}\right) \cdot (\Delta i_{mix} + t \cdot c_{pa}) \quad (4)$$

$$\Delta i_{mix} = 0,27086 + 139,468 \cdot \left(\frac{x_a}{100}\right) \cdot \ln\left(\frac{x_a}{100}\right) \quad (5)$$

$$t_{zl} = t_{zam} = \sum_{i=0}^5 C_i \cdot (x_a - 38,925)^i \quad (6)$$

$$x_s = \frac{x_a - x_{ai}}{x_a} \quad (7)$$

Układ równań (1÷7) pozwala na przeprowadzenie obliczeń cieplnych chłodziw zasilanych zawiesiną lodową, pod warunkiem określenia wartości współczynnika przenikania ciepła k_A . Wymiana ciepła po stronie chłodzonego powietrza odpowiada procesowi konwekcji wymuszonej przy opływie pęczka rur lamelowanych. Dla procesu

przejmowania ciepła po stronie powietrza współczynnik przejmowania ciepła i sprawność żebra można wyznaczyć np. z zależności Schmidta [3]. W przypadku płytowych chłodnic cieczy współczynnik przejmowania ciepła po stronie chłodzonego medium można wyznaczyć z zależności Gnielinskiego [4]. W lamelowanych chłodnicach powietrza przepływ zawiesiny lodowej odpowiada nieadiabacznemu przepływowi zawiesiny w rurze. Natomiast w płytowych wymiennikach ciepła przepływ zawiesiny lodowej można potraktować jako przepływ w kanale szczelinowym. Te przypadki wymiany ciepła w przepływie zawiesiny lodowej były szczegółowo analizowane w pracach [2], [5]. Określając wartość współczynnika przejmowania ciepła zawiesiny lodowej należy uwzględnić nienewtonowski charakter przepływu zawiesiny oraz występowanie przemiany fazowej w procesie wymiany ciepła. Zjawiska te zostały ujęte zarówno dla przepływu przez rurę jak i kanału szczelinowego we własnych zależnościach udokumentowanych własnymi wynikami badań w [5]:

– zakres laminarny przepływu

$$Nu = B \cdot (Gz_K)^m \cdot \left(\frac{\Delta x_s \cdot K_F}{100} \right)^p \cdot \left(\frac{d_s}{d_w} \right)^y \quad (8)$$

– zakres turbulentny przepływu

$$Nu = B \cdot (Pe_K)^m \cdot \left(\frac{d_s}{d_w} \right)^y \quad (9)$$

Wartości współczynników B , m , p , y dla różnych przekrojów poprzecznych kanału oraz różnych zakresów przepływu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Współczynniki w równaniach (8) i (9)

Przekrój poprzeczny	Charakter ruchu	B	m	p	y	Zakres stosowności
rura	laminarny	2,52	0,11	-0,10	-0,35	$3\% < x_s < 30\%$ $v_m > 0,1$ m/s $200 < Re_K < 2100$
	turbulentny	0,0096	0,70	-	-0,1	$3\% < x_s < 30\%$ $v_m < 4,5$ m/s $2100 < Re_K < 11000$
kanał szczelinowy	laminarny	3,66	0,16	-0,28	-0,12	$5,6\% < x_s < 30\%$ $v_m > 0,5$ m/s $30 < Re_K < 2300$
	turbulentny	0,0032	0,86	-	-	$3\% < x_s < 30\%$ $v_m < 3,1$ m/s $1900 < Re_K < 6000$

Ze względu na nienewtonowski charakter przepływu w definicji liczby Greatza (Gz_K) i Pecleta (Pe_K) wprowadzono uogólnioną definicję liczby Reynoldsa według Kozickiego [6]:

$$Re_K = \frac{\rho_{zl} \cdot v_m^{2-n} \cdot d_h^n}{8^{n-1} \cdot K} \quad (10)$$

Uogólnione parametry n (wskaźnik płynięcia) i K (stała konsystencji) zależne są od właściwości reologicznych cieczy, średnich naprężeń stycznych na ścianie, średniej prędkości przepływu. Rozważana zawieszina lodowa, utworzona na bazie etanolu, jest cieczą Bingham [2], [5], [7]. Dla cieczy Bingham i przekroju o dowolnej geometrii n i K wyznacza się z zależności (11-12) (dla rury: $c = 0,75$; $d = 0,75$, dla przekroju szczelinowego $c = 0,5$; $d = 1$)[6]:

$$n^* = \frac{c \left[\frac{1 - \epsilon_B^{1+d/c}}{c+d} - \frac{\epsilon_B (1 - \epsilon_B^{d/c})}{d} \right]}{1 - \epsilon_B - d \left[\frac{1 - \epsilon_B^{1+d/c}}{c+d} - \frac{\epsilon_B (1 - \epsilon_B^{d/c})}{d} \right]} \quad (11)$$

$$K^* = (c \mu_p)^{n^*} \tau_w^{1+d n^*/c} \left[\frac{c}{c+d} \tau_w^{1+d/c} - \frac{c}{d} \tau_w^{d/c} \tau_p + \frac{c^2}{d(c+d)} \tau_p^{1+d/c} \right]^{-n^*} \quad (12)$$

Właściwości reologiczne zawiesziny lodowej będącej cieczą Bingham opisane są dynamicznym współczynnikiem lepkości plastycznej μ_p oraz granicznym naprężeniem stycznym τ_p [2], [5]. Współczynnik ϵ_B jest równy ilorazowi granicznego naprężenia stycznego τ_p oraz naprężenia stycznego na ścianie kanału τ_w . Naprężenie styczne τ_w na ścianie kanału można wyznaczyć z zależności (13):

$$\tau_w = c_f (Re_K) \cdot \frac{\rho_{zl} \cdot v_m^2}{2} = \frac{d_h \cdot \Delta p}{4 \cdot L} \quad (13)$$

w której współczynnik oporów Fanninga c_f wyznacza się ze wzorów (14) [2], [7]:

$$c_f(\tau_w) = \begin{cases} \frac{16}{Re_K} & \text{dla } Re_K(\tau_w) < 2100 \\ 0,079 \\ Re_K^{0,25} & \text{dla } Re_K(\tau_w) > 2100 \end{cases} \quad (14)$$

Czynnik równania (8) zawierający liczbę przejścia fazowego K_F pozwala uwzględnić wpływ wytapiania lodu na proces przejmowania ciepła pomiędzy zawiesziną lodową i ścianą kanału. Liczba przejścia fazowego K_F definiowana jest zależnością (15) [2], [5]:

$$K_F = \frac{r}{c_{pzi} \cdot \Delta T} \quad (15)$$

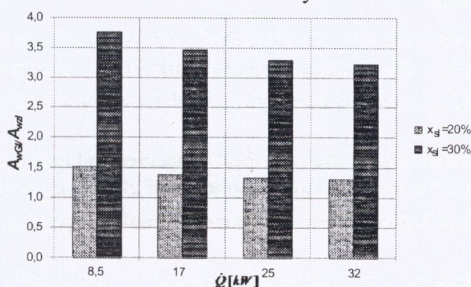
Opory przepływu dla cieczy newtonowskich mogą być wyznaczone również z zależności (13÷14), w których liczba Re_K odpowiada liczbie Reynoldsa według Kozickiego wyznaczanej dla średnicy hydraulicznej przekroju poprzecznego przepływu.

2. Wyniki obliczeń dla wymienników zasilanych zawiesiną lodową i wodnym roztworem glikolu etylenowego

Przedstawiony algorytm obliczeń cieplnych i przepływowych dla zawiesiny lodowej został wykorzystany do wykonania obliczeń projektowych lamelowanych chłodziń powietrza oraz płytowych chłodziń cieczy zasilanych zawiesiną lodową. Wyniki obliczeń dla zawiesiny lodowej porównano z wynikami obliczeń cieplnych wymienników zasilanych 23,6% wodnym roztworem glikolu etylenowego. Obliczenia pól powierzchni wymiany ciepła wykonano dla dwóch różnych początkowych udziałów masowych lodu $x_{s1} = 20\%$ ($t_{z11} = -5,9^{\circ}\text{C}$) i $x_{s1} = 30\%$ ($t_{z11} = -7,1^{\circ}\text{C}$) przy założonych wydajnościach cieplnych wymiennika oraz przy założeniu całkowitego wytapiania lodu.

2.1. Wyniki obliczeń dla chłodziń powietrza

Obliczenia dla chłodziń powietrza wykonano dla wydajności z zakresu: $\dot{Q} = (8,5; 32)$ kW. Przedmiotem porównania były pola powierzchni wymiany ciepła chłodziń powietrza o tych samych wydajnościach, ale zasilanych tym samym strumieniem masy zawiesiny lodowej i wodnego roztworu glikolu. Wyniki przedstawione na rysunku 1 wskazują, że dla tych samych strumieni masy zawiesiny lodowej oraz glikolu uzyskanie takiej samej wydajności cieplnej wymaga większego pola powierzchni wymiany ciepła chłodziń glikolowej w porównaniu z polem powierzchni chłodziń zasilanej zawiesiną lodową. Przy czym zdecydowanie pod tym względem bardziej opłaca się zasilac chłodziń 30% zawiesiną lodową w stosunku do 20% zawiesiny.

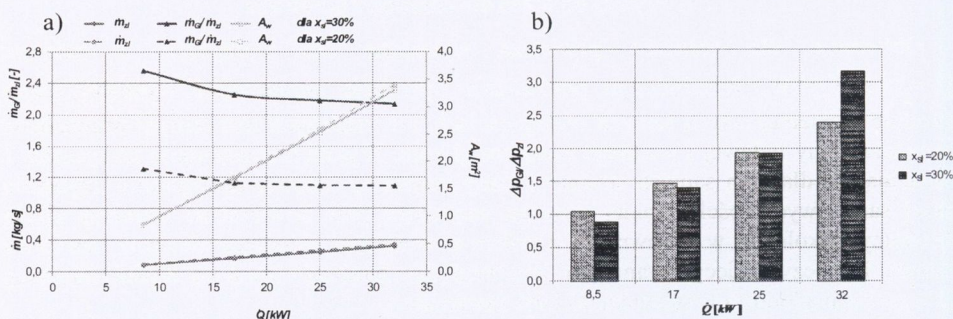


Rys. 1. Relacje pól powierzchni chłodziń powietrza zasilanych wodnym roztworem glikolu etylenowego lub zawiesiną lodową

Fig. 1. Relationships between surface areas of air coolers fed with aquatic solution of ethylene glycol or ice slurry

Uzyskanie przez chłodziń powietrza tej samej wydajności cieplnej, przy tym samym polu powierzchni wymiany ciepła wymaga zasilania jej większym strumieniem masy wodnego roztworu glikolu niż strumieniem masy zawiesiny lodowej. Efekt wzrostu strumienia masy glikolu w stosunku do strumienia masy zawiesiny lodowej ilustruje rysunek 2a. Analiza rysunku 2a wskazuje, że przy tym samym polu powierzchni wymiany ciepła i wydajności cieplnej, chłodziń zasilane glikolem wymagają zasilania ich kilkakrotnie wyższym strumieniem masy glikolu w stosunku do wymienników zasilanych zawiesiną lodową. Im

początkowy udział masowy lodu jest wyższy tym relacja $\dot{m}_{gl} / \dot{m}_{zl}$ jest większa. Należy to tłumaczyć faktem, że w przypadku zawiesiny lodowej ciepło oddawane przez powietrze przekazywane jest głównie na proces wytapiania lodu, który dla założonego stężenia początkowego roztworu cieczy nośnej $x_a = 10,6\%$ przebiega prawie przy stałej temperaturze. W odróżnieniu od zawiesiny lodowej glikol wymienia jedynie ciepło jawne. Dodatkowo w przypadku chłodnicy powietrza współczynnik przenikania ciepła determinowany jest przez proces przejmowania ciepła po stronie powietrza. Stąd strumień masy glikolu ma niewielki wpływ na współczynnik przenikania ciepła. Natomiast odpowiednie pole powierzchni wymiany ciepła może być uzyskane poprzez zmianę średniej logarytmicznej różnicy temperatur. Osiągnięcie w chłodnicy glikolowej podobnej średniej różnicy temperatur, jak w przypadku chłodnicy zasilanej zawiesiną lodową, wymaga stosowania większych strumieni masy glikolu.



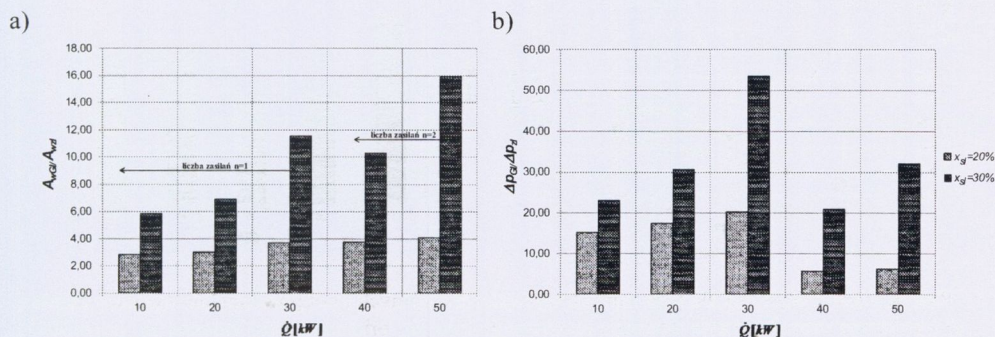
Rys. 2. Wyniki obliczeń dla tych samych wydajności cieplnych i pól powierzchni wymiany ciepła:
 a) wymagane strumienie masy wodnego roztworu glikolu \dot{m}_{gl} oraz zawiesiny lodowej \dot{m}_{zl} ;
 b) relacje oporów przepływu chłodziw w wymiennikach.

Fig. 2. Results of calculations for the same heat capacities and heat exchange surface areas:
 a) required mass fluxes of an aquatic solution of glycol \dot{m}_{gl} and ice slurry \dot{m}_{zl} ;
 b) relationships between flow resistances of cooling agents in exchangers.

Przestawione na rysunku 2b. porównanie oporów przepływu (tarcia) obu chłodziw wskazuje, że z wyjątkiem wymiennika o najniższej wydajności cieplnej i 30% zawiesiny lodowej w pozostałych przypadkach spadek ciśnienia glikolu w wymiennikach był wyższy niż w przypadku zawiesiny lodowej. Wynika to oczywiście z większych wymaganych strumieni masy glikolu oraz faktu, że przepływu w wymiennikach glikolowych ma charakter burzliwy natomiast w wymiennikach zasilanych zawiesiną lodową odbywa się w obszarze przepływu laminarnego [7]. Opory przepływu oraz strumień objętości mają wpływ na moce pomp przetłaczających czynnik w instalacji. W związku z tym dla rozważanego zakresu wydajności i konstrukcji wymienników, chłodnice glikolowe wymagają o $1,8 \div 3,5$ lub $2 \div 6,3$ razy większych mocy pomp niż chłodnice zasilane odpowiednio 20 lub 30% zawiesiną lodową.

2.2. Wyniki obliczeń dla chłodnicy cieczy

Obliczenia dla chłodnic cieczy wykonano dla wymienników płytowych o wydajnościach z zakresu: $\dot{Q} = (10; 50)$ kW, służących do schładzania mleka. Przedmiotem porównania były pola powierzchni wymiany ciepła chłodnic cieczy o tych samych wydajnościach, zasilanych tym samym strumieniem masy zawiesiny lodowej lub wodnym roztworem glikolu. W odróżnieniu od chłodnic powietrza, w tym przypadku właściwości zawiesiny lodowej jako chłodziwa mogą być jeszcze pełniej wykorzystane. Wynika to zarówno z prawie stałej temperatury chłodziwa, jak również dużej wartości współczynnika przejmowania ciepła po stronie zawiesiny lodowej ($\alpha_{z_l} = 2700; 6900$ W/(m²K)) oraz porównywalnych z nimi wartości współczynników przejmowania ciepła po stronie medium chłodzonego-mleka ($\alpha_{mleko} = 700; 3100$ W/(m²K)). Stąd chłodnice cieczy zasilane zawiesiną lodową charakteryzują się większymi logarytmicznymi różnicami temperatur oraz większymi wartościami współczynników przenikania ciepła w stosunku do chłodnic glikolowych. Wyniki obliczeń pól powierzchni dla chłodnic cieczy zasilanych wodnym roztworem glikolu lub zawiesiny lodowej przedstawiono na rysunku 3a. Rysunek 3a wskazuje istotny (nawet kilkunastokrotny) wzrost wymaganego pola powierzchni wymiany ciepła w przypadku chłodnic zasilanych roztworem glikolu, szczególnie w porównaniu z chłodnicami zasilanymi 30% zawiesiną lodową. Niemonotoniczny charakter zmian $A_{Gl} / A_{z_l}(\dot{Q})$ wynika z konieczności zwiększenia liczby zasilających dla wymienników o wydajności większej niż 30 kW, ze względu na ograniczenie prędkości przepływu mediów pomiędzy płytami wymiennika poniżej 1,0 m/s. Przy czym maksymalizacja współczynników przejmowania ciepła dla glikolu wymaga stosowania większych prędkości przepływu (mniejsza liczba zasilających), niż w przypadku wymienników z zawiesiną lodową.

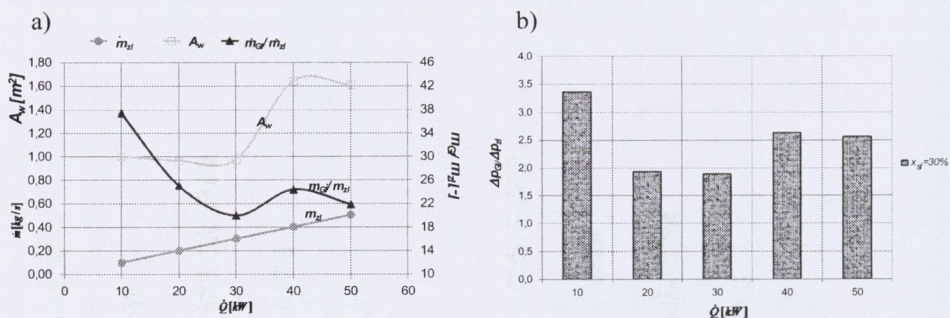


Rys. 3. Porównanie chłodnic cieczy zasilanych wodnym roztworem glikolu etylenowego lub zawiesiną lodową: a) relacje pól powierzchni dla tych samych strumieni mas chłodziw; b) relacje oporów przepływu chłodziw w wymiennikach

Fig. 3. Comparison of liquid coolers fed with an aquatic solution of ethylene glycol or ice slurry: a) relationships between surface areas for the same mass fluxes of coolants; b) relationships between flow resistances of coolants in the exchangers

Na rysunku 3b przedstawiono porównanie oporów przepływu roztworu glikolu oraz zawiesiny lodowej. Drastyczny wzrost oporów przepływu po stronie glikolu spowodowany jest w tym przypadku większą liczbą płyt wymiennika (wzrost pola powierzchni wymiany ciepła) oraz większą prędkością przepływu roztworu glikolu w porównaniu z prędkością przepływu zawiesiny lodowej. Należy zauważyć, że zwiększenie liczby zasilań nie musi prowadzić do obniżenia oporów przepływu po stronie roztworu glikolu. Zwiększenie liczby zasilań powoduje zarówno spadek prędkości przepływu oraz spadek współczynnika przejmowania ciepła po stronie roztworu glikolu. Ponieważ wartości te są niskie ($\alpha_{Gl} = 700; 1300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) w relacji do współczynników przejmowania ciepła po stronie mleka, stąd obniżenie prędkości przepływu roztworu glikolu obniża współczynnik przenikania ciepła dla wymiennika i w konsekwencji powoduje wzrost pola powierzchni wymiany ciepła, długości przepływu i oporów przepływu.

Obliczenia zmierzające do wyznaczenia strumienia masy glikolu w chłodnicy cieczy o takim samym polu powierzchni i wydajności cieplnej jak w przypadku chłodnicy zasilanej zawiesiną lodową wskazują na kilkudziesięciokrotny wzrost strumienia masy roztworu glikolu (rys. 4a). Warunek ograniczenia prędkości przepływu przy tak dużym strumieniu masy chłodziwa wymaga założenia istotnie większej liczby zasilań dla wymiennika zasilanego roztworem glikolu, w stosunku do wymiennika zasilanego zawiesiną lodową. Konsekwencją wzrostu strumienia masy roztworu glikolu jest wzrost oporów przepływu po stronie tego chłodziwa (rys. 4b). Ze względu na kilkukrotne zwiększenie liczby zasilań dla wymiennika glikolowego wzrost oporów przepływu nie jest tak drastyczny jak w wariancie obliczeń ze stałym strumieniem masy glikolu i zawiesiny lodowej.



Rys. 4. Wyniki obliczeń dla tych samych wydajności cieplnych i pól powierzchni wymiany ciepła:
 a) wymagane strumienie mas wodnego roztworu glikolu \dot{m}_{Gl} oraz zawiesiny lodowej \dot{m}_{sl} ($x_{sl} = 30\%$);
 b) relacje oporów przepływu chłodziw w wymiennikach.

Fig. 4. Results of calculations for the same heat capacities and heat exchange surface areas:
 a) required mass fluxes of an aquatic solution of glycol \dot{m}_{Gl} and ice slurry \dot{m}_{sl} ($x_{sl} = 30\%$);
 b) relationships between flow resistances of coolants in the exchangers.

3. Podsumowanie

Przedstawiony algorytm obliczeń ciepłno-przepływowych dla wymienników zasilanych zawiesiną lodową pozwala na prowadzenie analiz zmierzających do określenia wymaganych parametrów przepływowych i parametrów geometrycznych wymienników. Pole powierzchni wymiennika oraz strumienie mas i spadki ciśnień czynników (dobór pomp, średnic przewodów) determinują koszty inwestycyjne instalacji. Koszty eksploatacyjne pośrednich systemów chłodzenia uwarunkowane są mocą pomp, która jest konsekwencją oporów przepływu i strumienia objętości chłodziw. Nie bez znaczenia dla kosztów eksploatacyjnych w systemach klimatyzacyjnych jest możliwość uzyskiwania niższych temperatur powietrza pierwotnego w wymiennikach zasilanych zawiesiną lodową. Pozwala to zredukować strumień objętości powietrza pierwotnego i moce wentylatorów.

Obecnie zawiesina lodowa wykorzystywana jest między innymi jako alternatywa wody lodowej w dużych kompleksach hotelowo-handlowo-usługowych. Przedstawione w pracy wyniki obliczeń wskazują na szczególną możliwość obniżenia kosztów eksploatacyjnych pośrednich systemów chłodzenia cieczy. Zatem należy zwrócić szczególną uwagę na zastosowanie zawiesiny lodowej jako chłodziwa w zakładach mleczarskich, browarach, czy w zakładach produkcyjnych soków owocowych. Dodatkowo uwzględnienie możliwości akumulacji „chłodu” w zawieszynie lodowej istotnie ogranicza wielkość agregatu chłodniczego oraz koszty wytwarzania zawiesiny produkowanej w okresach taniej energii elektrycznej. Niższe koszty eksploatacyjne, obniżenie kosztów inwestycyjnych po stronie instalacji pośredniego układu chłodzenia wraz z możliwością dodatkowego ograniczenia kosztów eksploatacyjnych, dzięki wykorzystaniu akumulacji ciepła w zawieszynie lodowej, stwarza perspektywę amortyzacji w rozsądnym okresie czasu (około 5-ciu lat) instalacji opartej o to chłodziwo.

Oznaczenia

A	– pole powierzchni wymiany ciepła	$[m^2]$
c_p	– ciepło właściwe	$[J/(kg \cdot K)]$
d	– średnica	$[m]$
$Gz_k = Re_k \cdot Pr_B \cdot \frac{d_w}{L}$	– liczba Graetz,	$[-]$
i	– entalpia właściwa	$[J/kg]$
k_A	– współczynnik przenikania ciepła	$[W/(m^2 \cdot K)]$
\dot{m}	– strumień masy	$[kg/s]$
$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda}$	– liczba Nusselta,	$[-]$
$Pe_B = Re_k \cdot Pr$	– liczba Peckleta zawiesiny lodowej,	$[-]$
\dot{Q}	– wydajność cieplna wymiennika ciepła	$[W]$
r	– ciepło topnienia lodu	$[J/kg]$
t	– temperatura	$[^\circ C]$

v_m	– średnia prędkość przepływu	[m/s]
x_a	– stężenie cieczy nośnej	[%]
x_s	– udział masowy lodu	[%]
α	– współczynnik przejmowania ciepła	[W/(m ² ·K)]
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła zawiesiny lodowej	[W/(m·K)]
ε_B	– iloraz czynnych naprężeń stycznych płynu Binghama,	[-]
μ_p	– dynamiczny współczynnik lepkości plastycznej	[Pa·s]
ρ	– gęstość	[kg/m ³]
τ_p	– graniczne (plastyczne) naprężenie styczne	[Pa]
τ_w	– naprężenie styczne na ścianie rury	[Pa]

Indeksy

a	– ciecz nośna
Gl	– glikol
m	– wartość średnia
mix	– mieszanina
s	– lód
zam	– zamarzanie
zl	– zawiesina lodowa

Literatura

- [1] Melinder A.: *Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants. Tables and diagrams for the refrigerants industry*, IIF/IIR, Paris, 1997.
- [2] Niezgoda-Żelasko B.: *Wymiana ciepła i opory przepływu zawiesiny lodowej w przewodach*, Monografia 334, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006
- [3] Schmidt K. G.: *Wärmeübergang an berippten Oberflächen*. VDI-Wärmeatlas, (2002), Mb.
- [4] Gnielinski V.: *VDI – Wärmeübertragung bei der Strömung durch Rohre*, VDI-Wärmeatlas, (2002), Gb.
- [5] Niezgoda-Żelasko B., Żelasko J.: *Generalized non-newtonian heat exchange. Flow of ice slurry in pipes*, Chemical and Process Engineering, 30, (2009), 453–473.
- [6] Kozicki W., Chou C.H., Tiu C.: *Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape*, Chemical Engineering Science, 21, (1966), 665–679.
- [7] Niezgoda-Żelasko B., Zalewski W.: *Momentum transfer of ice slurries flows in tubes. Experimental investigation*, International Journal of Refrigeration, 2, (2006).