

BEATA NIEZGODA-ŻELASKO, JERZY ŻELASKO\*

WYMIANA CIEPŁA ZAWIESINY LODOWEJ PODCZAS  
LAMINARNEGO PRZEPIYWU W KANAŁACH

---

LAMINAR HEAT TRANSFER  
OF ICE SLURRY IN TUBE

Streszczenie

Praca przedstawia wyniki badań eksperymentalnych wymiany ciepła zawiesiny lodowej podczas laminarnego przepływu w kanałach o przekrojach kołowym, prostokątnym oraz szczelinowym.

*Słowa kluczowe: zawiesina lodowa, wymiana ciepła, topnienie, uogólniony przepływ cieczy nienewtonowskiej*

Abstract

The paper presents the results of experimental research on heat transfer of ice slurry during its laminar flow through tubes of circular, rectangular and slit cross-sections.

*Keywords: ice slurry, heat transfer, melting, generalized non-Newtonian fluid flow*

---

\* Dr hab. inż. Beata Niezgoda-Żelasko, dr inż. Jerzy Żelasko,  
Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Lód zawieszinowy należy do grupy nośników ciepła (chłodziw). Zawiesina lodowa jest mieszaniną kryształków lodu wodnego i wody lub wody z dodatkiem środka obniżającego temperaturę krzepnięcia (soli, glikolu, alkoholu). Zawiesina lodowa jest płynem nienewtonowskim. W prezentowanej pracy przedmiotem rozważań będzie proces wymiany ciepła z udziałem zawiesiny lodowej utworzonej na bazie 10,6 % roztworu etanolu, będącej płynem Binghama [1], której przepływ traktowany będzie jako uogólniony przepływ cieczy nienewtonowskiej. Wyniki badań przepływowych i cieplnych dotyczące rozważanej zawiesiny zawarte w [1] wskazują, że w przypadku wykorzystania topnienia kryształków lodu w bezpośrednich procesach chłodzenia celowe jest stosowania zakresów prędkości i zawartości lodu gwarantujących homogeniczny przepływ medium w obszarze laminarnym. Dlatego szczegółowo omówiony zostanie proces wymiany ciepła zachodzący podczas laminarnego przepływu zawiesiny lodowej w kanałach o różnych przekrojach poprzecznych.

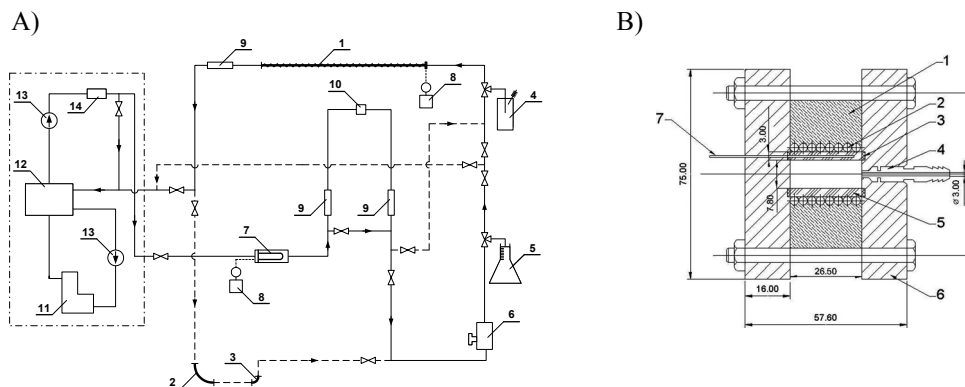
## 2. Badania eksperymentalne

Własne badania eksperymentalne procesów przepływowych i cieplnych lodu zawieszinowego przeprowadzone zostały na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 1.

Program badań obejmował pomiary parametrów przepływowych i cieplnych dla przepływu lodu zawieszinowego przez:

- rury miedziane o średnicach  $d_i = 0,01; 0,016; 0,02$  m i długościach  $L=4,6$  m,  $L_{Heat} = 1,5, \dots, 2,85$  m,
- kanał o przekroju prostokątnym i wymiarach:  $0,0078 \times 0,0265 \times 3,0$  m (rys. 1B),  $L_{Heat} = 1,52$  m,
- kanał o przekroju prostokątnym (szczelinowym) i wymiarach:  $0,003 \times 0,0358 \times 2,0$  m,  $L_{Heat} = 0,65$  m.

Najważniejszymi elementami instalacji są wymienne kanały pomiarowe o długości max 4,6 m. W przypadku rur wymiar 4,6 m zapewnia odpowiednią długość odcinków: stabilizacji przepływu, pomiaru oporów przepływu oraz redukcji efektu wylotowego. Wybrane długości cieplnych odcinków pomiarowych gwarantowały ukształtowany hydrodynamicznie i termicznie przepływ zawiesiny lodowej w obszarze turbulentnym. Dla laminarnego przepływu wewnątrz rur pomiary wykonywano w części odcinka rozbiegowego, w której przepływ był ukształtowany hydrodynamicznie i praktycznie ukształtowany termicznie. Występujące w niniejszej pracy wartości  $L_{Heat}/d_h$  są znacząco wyższe od powszechnie spotykanych w badaniach cieplnych przepływu zawiesin lodowych przez rury ( $L_{Heat}/d_h < 80$ ) [3], [4]. W przypadku badań cieplnych przepływu zawiesiny lodowej przez kanały o przekrojach prostokątnych Stamatiou i Kawaji [5], [6] wykonali badania dla kanałów o średnicach hydraulicznych  $d_h = 0,023$  i  $0,047$  m oraz wartościach  $L_{Heat}/d_h = 11$  i  $22$ .



Rys. 1. A) Schemat stanowiska pomiarowego pomiarowego 1-ogrzewany odcinek pomiarowy, 2-luk, 3-kolanko, 4-pomiar kalorymetryczny, 5-pomiar : gęstości, zmiany objętości, zawartości lodu i powietrza, 6-masowy miernik przepływu, 7-grzałka, 8-watomierz i autotransformator, 9- wizualizacja przepływu, 10-odpowietrznik, 11-wytwornica lodu, 12-zbiornik akumulacyjny, 13-pompa, 14-miernik strumienia objętości; B) Przekrój przez kanał prostokątny: 1-izolacja cieplna, 2-kabel grzewczy, 3- uszczelka, 4-króciec, 5-ścianka z miedzi, 6-ścianka z plexi, 7-tuleja czujnika temperatury [1]

Fig. 1. A) Schematic diagram of the test stand: -heated measuring segment, 2-elbow, 3- bend, 4- calorimetric measurement, 5-measurement of: density, volume change, ice and air content, 6-mass flow-meter, 7-heater, 8-wattmeter and autotransformer, 9-flow visualization, 10-air-escape, 11-ice generator, 12-accumulation container, 13-pump, 14-volume flow-meter; B) Cross-section of a rectangular channel: 1-thermal insulation, 2-heating cable, 3-seal, 4-connector, 5-copper wall, 6-plexiglass wall, 7-temperature sensor sleeve [1]

Badania wymiany ciepła zawiesziny lodowej wykonane były w warunkach stałej gęstości strumienia ciepła. Zestawienie najważniejszych przyrządów pomiarowych wykorzystanych w badaniach zamieszczono w tabeli 1.

Pomiar temperatury lodu zawieszinowego oparty jest o precyzyjne czujniki oporowe o dużych gabarytach Pt100(7013) (średnica płaszczka czujnika – ok. 5 mm, długość czynna min. 0,02 m). Pomiar różnicy temperatury ścianki i przepływającego czynnika dokonywany jest przy użyciu czujników Pt100(5622-05) (średnica płaszczka czujnika – 0,5 mm, długość czynna min. 0,01 m). W celu zapewnienia wysokiej dokładności pomiaru tej różnicy temperatur przeprowadzono wzorcowanie czujników w pełnym, spodziewanym zakresie temperatur. Wzorcowania dokonano przy użyciu czujników precyzyjnych (Pt100(7013)), bezpośrednio na stanowisku pomiarowym, po uprzednim zainstalowaniu wszystkich czujników. Podczas wzorcowania wymiana ciepła występowała wyłącznie pomiędzy płynącym, z określoną prędkością, lodem zawieszinowym o znanym udziale masowym lodu a otoczeniem. Stworzony w ten sposób układ precyzyjnego pomiaru różnicy temperatury (ścianki rury i czynnika w niej płynącego) ma dokładność porównywalną z dokładnością czujników Pt100(7013). Dzięki temu stworzono precyzyjny układ pomiarowy umożliwiający pomiar różnicy temperatur z dokładnością nie większą niż 0,04 K w całym spodziewanym zakresie temperatur [1]. Pomiar temperatury lodu zawieszinowego umożliwiły tuleje termometryczne zainstalowane na wlocie i wylocie z odcinka pomiarowego oraz w kilku innych miejscach instalacji. W obrębie odcinka pomiarowego

pomiar temperatury lodu zawieszinowego dokonywany był przy użyciu termometru oporowego Pt100(5622-05), wprowadzonego bezpośrednio do płynu przez specjalną dławniczkę. Pomiar temperatury ścianki w przypadku przekroju prostokątnego realizowany był za pomocą tego samego typu termometru, wprowadzonego do tulei termometrycznej wywierconej we wnętrzu ścianki (element 7 na rysunku 2b). W przypadku rur o przekroju kołowym temperatura ścianki (grubości 1,0 mm) mierzona jest przy użyciu także termometru oporowego Pt100(5622-05), wlutowanego do ścianki w rowku o głębokości min. 0,6 mm.

Tabela 1

Przyrządy pomiarowe wykorzystywane na stanowisku pomiarowym [1]

Przyrząd	Typ	Zakres pomiarowy	Dokładność
Przetwornik różnicy ciśnień	Fuji FKCV 33V4LKAYYAA	0 ÷ 32 [Kpa]	0,07 % zakresu pomiarowego
	Fuji FKCV 11V4LKAYYAA	0 ÷ 1 [Kpa]	
Czujniki temperatury	HART Scientific	-100 ÷ 100 [°C]	0,018 [K]
	Pt100(7013) - Ø5 [mm] Pt100(5622-05) - Ø0,5 [mm]	-200 ÷ 350 [°C]	0,15 [K]
Masowy miernik przepływu	Danfoss MASSFLO 2100	0 ÷ 5 600 [kg/h] 0,1 ÷ 2,9 [g/cm <sup>3</sup> ]	0,1 % przepływu 0,0005 [g/cm <sup>3</sup> ]

Współczynnik przejmowania ciepła wyznaczany był dla końcowej części cieplnego elementu pomiarowego wg zależności

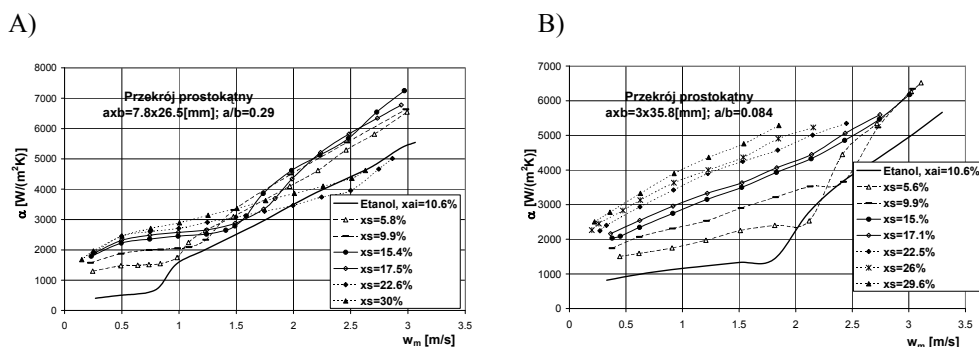
$$\alpha = \frac{\dot{q}_m}{T_w - T_f} \quad (1)$$

w której gęstość strumienia ciepła  $\dot{q}_m$  odpowiada rzeczywistej gęstości strumienia ciepła przekazywanego zawieszinie lodowej. Zmiana udziału masowego lodu spowodowana jego wytopianiem  $\Delta x_s = x_{sin} - x_{sout}$  obliczana była z równania bilansu ciepła zawiesziny lodowej:

$$\dot{q}_m \cdot A_w = \dot{m} \cdot [h_{out}(T_{fout}, x_{sout}) - h_{in}(T_{fin}, x_{sin})] \quad (2)$$

Temperatury zawiesziny lodowej  $T_{fin}$  i  $T_{fout}$  mierzone odpowiednio na wlocie i wylocie z odcinka pomiarowego odpowiadały wyrównanej temperaturze medium po jego zmieszaniu. W celu uwzględnienia wpływu przyjętego modelu reologicznego zawiesziny na wartość współczynnika przejmowania ciepła mierzono również rzeczywistą wartość oporów przepływu na odcinku pomiarowym za pomocą przetwornika różnicy ciśnień.

Na rysunku 2 przedstawiono eksperymentalne wartości współczynników przejmowania ciepła wyznaczone dla przekrojów: prostokątnego ( $a \times b = 0,0078 \times 0,0265$  m) i szczelinowego ( $a \times b = 0,003 \times 0,0358$  m). Szczegółowe omówienie wyników badań eksperymentalnych wymiany ciepła podczas przepływu przez rury zostało przedstawione w pracy [7]. Analiza procesu wymiany ciepła podczas przepływu przez rury wskazuje, że w obszarze przepływu laminarnego obecność cząstek stałych powoduje 2–5,7-krotny wzrost współczynnika przejmowania ciepła w stosunku do współczynników przejmowania ciepła cieczy nośnej (etanolu  $x_{ai} = 10,6\%$  w temperaturze  $-4,5$  °C). Z drugiej zaś strony istnieją prędkości, przy których dla zawieszin o zawartości lodu  $x_s > 10 - 20\%$  współczynniki przejmowania ciepła są niższe niż współczynniki przejmowania ciepła cieczy nośnej.



Rys. 2. Eksperymentalne wartości współczynników przyjmowania ciepła wyznaczone dla przekrojów: A) prostokątnego ( $a \times b = 0,0078 \times 0,0265$  m) i B) szczelinowego ( $a \times b = 0,003 \times 0,0358$  m)

Fig. 2. Experimental values of heat transfer coefficient for:

A) Rectangular channel  $a \times b = 0,0078 \times 0,0265$  m, B) Slit channel ( $a \times b = 0,003 \times 0,0358$  m)

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że w rozważanym przedziale zmian gęstości strumienia ciepła ( $2000 \leq \dot{q} \leq 8000$  W/m<sup>2</sup>) ma ona znikomy wpływ na współczynniki przyjmowania ciepła [7]. Dla przepływu przez kanał o przekroju prostokątnym podobnie jak w przypadku przepływu przez rury obserwuje się wzrost współczynnika przyjmowania ciepła zawiesiny lodowej w stosunku do współczynnika przyjmowania ciepła cieczy nośnej. Wpływ cząsteczek stałych na wzrost współczynnika przyjmowania ciepła zawiesiny lodowej w stosunku do etanolu wskazuje, że im mniejsza jest średnica hydrauliczna przewodu tym mniejszy jest wzrost współczynnika przyjmowania ciepła lodu zawieszinowego w porównaniu ze współczynnikiem przyjmowania ciepła etanolu. W obszarze przepływu laminarnego ta relacja wynosi 3,2 – 4,8 dla przekroju  $a/b = 0,29$ ;  $d_h = 0,012$  m oraz 1,9 – 3,4 dla przekroju  $a/b = 0,084$ ;  $d_h = 0,0055$  m. Podobną tendencję obserwowano dla przepływu przez rury. Pod tym względem przepływ przez kanał prostokątny (szczelinowy)  $a/b = 0,084$  odpowiadał przepływowi przez rurę o średnicy  $d_i = 0,01$  m (2,5 – 4). Natomiast przepływ przez kanał prostokątny o średnicy hydraulicznej  $d_h = 0,012$  m był zbliżony do przepływu przez rurę o średnicy  $d_i = 0,016$  m (3,5 – 4,7). Powyższe relacje wskazują, że na wartości współczynników przyjmowania ciepła zawiesiny lodowej mają wpływ dwa zjawiska. Jednym z nich jest efekt mikrokonwekcji zwiększający zastępczą wartość współczynnika przewodzenia ciepła zawiesiny cząstek stałych i intensyfikujący proces wymiany ciepła w strefie przyściennej. Im mniejsza jest średnica hydrauliczna przewodu tym większa prędkość ścinania i większa wartość zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła. Stąd też większa wartość współczynnika przyjmowania ciepła zawiesiny. Ale z drugiej strony ciepło dopływające do zawiesiny lodowej jest intensywniej pochłaniane przez cząsteczki lodu w strefie przyściennej w sposób podobny (ale nie tak samo) w kanałach o różnych średnicach hydraulicznych. Podobieństwo to powoduje, że wartości współczynników przyjmowania ciepła dla różnych średnic hydraulicznych przy przepływie zawiesiny lodowej są do siebie bardziej zbliżone niż analogiczne wartości współczynników przyjmowania ciepła dla etanolu.

Dodatkowo w przypadku zawiesin, przesuwanie się krytycznej liczby Reynoldsa w kierunku większych wartości dla większych udziałów masowych lodu powoduje, że dla różnych średnic rur zrywanie warstwy przyściennej spowodowane turbulizacją przepływu nastąpi później (dla większych prędkości) w przypadku rur o mniejszych średnicach.

Porównanie współczynników przejmowania ciepła dla przepływu przez przewody o przekrojach kołowych i prostokątnych wskazują, że niezależnie od charakteru ruchu, dla tych samych prędkości i zawartości lodu współczynniki przejmowania ciepła zawiesiny lodowej w kanale prostokątnym są większe niż w przypadku przewodu o przekroju kołowym. Wzrost współczynników przejmowania ciepła w kanałach o przekrojach prostokątnych może być spowodowany efektem wlotowym oraz oddziaływaniem cząsteczek stałych ( $d_s = 0,1/0,15\text{mm}$ ) z warstwą przyścienną. W przeprowadzonych badaniach względna długość cieplnych odcinków pomiarowych dla przewodów o przekrojach prostokątnych jest o 20% mniejsza niż w przypadku rur.

### 3. Metody określania współczynnika przejmowania ciepła dla zawiesiny lodowej

Szczegółowy przegląd literatury dotyczący metod wyznaczania współczynników przejmowania ciepła w zawiesinach przedstawiono w pracy [1], natomiast w zawiesinach lodowych w pracach [1], [3], [4].

W rozważanym przypadku, poszukując zależności określającej liczbę Nusselta dla zawiesiny lodowej dążono w odróżnieniu od innych autorów [3], [4] do:

- uwzględnienia nienewtonowskiego charakteru przepływu zawiesiny lodowej,
- uwzględnienia procesu przemiany fazowej zachodzącej w medium podczas przepływu i odbioru ciepła od ścianek rury,
- uwzględnienia faktu, że przepływ rozważanej zawiesiny jest przepływem wielofazowym,
- zachowania charakteru zmian współczynników przejmowania ciepła wraz ze zmianami prędkości i udziału masowego cząstek stałych.

Ogólna postać zależności kryterialnej na liczbę Nusselta w przypadku konwekcji wymuszonej, której towarzyszy przemiana fazowa wynika z równania energii oraz teorii podobieństwa i dla warunków ustalonych ma postać [2]

$$\text{Nu} = f\left(\text{Pe}, \frac{\dot{q}_{vo} \cdot L_o^2}{\lambda \cdot \Delta T}\right) \quad (3)$$

gdzie wydajność objętościowa  $\dot{q}_{vo}$  wewnętrznego źródła ciepła, przy założeniu liniowej zmiany udziału masowego lodu w funkcji długości rury  $L$ , może być wyznaczana z zależności

$$\dot{q}_{vo} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta x_s \cdot r}{100 \cdot A_p \cdot L} = w_m \cdot \rho_B \cdot r \cdot \frac{\Delta x_s}{L \cdot 100} \quad (4)$$

Zakładając, że  $L_o = d_h$  oraz korzystając z definicji liczb Prandtla  $\text{Pr}_B = (\mu_B \cdot c_{pB} / \lambda_B)$  i liczby przejścia fazowego  $\text{K}_F = r / (c_{pB} \cdot \Delta T)$  (gdzie  $\Delta T = T_w - T_f$ ) można drugi argument funkcji (3) sprowadzić do postaci

$$\frac{\dot{q}_{wo} \cdot L_o^2}{\lambda_o \cdot \Delta T_o} = \left( \text{Re}_B \cdot \text{Pr}_B \cdot \frac{d_h}{L} \right) \cdot \left( \frac{\Delta x_s}{100} \cdot K_F \right) \quad (5)$$

Przy założeniu wykładniczej postaci równania (3) można ostatecznie to równanie przedstawić jako

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Gz}_B^m \cdot \left( \frac{\Delta x_s}{100} \cdot K_F \right)^n \quad (6)$$

Równanie (6) uwzględnia zarówno wpływ konwekcji wymuszonej w odcinku stabilizacji termicznej (człon  $\text{Gz}_B^m$ ), jak również procesu topnienia lodu  $(\Delta x_s \cdot K_F / 100)^n$  na współczynniki przejmowania ciepła zawiesiny lodowej.

Dla ruchomych zawieszin wpływ wzrostu współczynników przewodzenia ciepła, na współczynniki przejmowania ciepła [8], uzależniony od średnicy cząstek stałych oraz prędkości ścinania, można uwzględnić poprzez wprowadzenie do równania (6) członu  $(d_s/d_h)^p$ .

Rozważana zawieszina lodowa jest płynem Bingham. Jej przepływ może być jednak traktowany jako uogólniony przepływ cieczy nienewtonowskiej [9]. Wymaga to modyfikacji równania (6) poprzez zastąpienie liczby Graetza ( $\text{Gz}_B$ ), liczbą Graetza zdefiniowaną dla uogólnionego przepływu zawiesiny lodowej:  $\text{Gz}_K = \text{Re}_K^* \cdot \text{Pr}_B(d_h / L_{\text{Heat}})$ . Uogólniona liczba Reynoldsa  $\text{Re}_K^*$  jest liczbą Reynoldsa zdefiniowaną przez Kozickiego  $\text{Re}_K^* = (\rho_B \cdot w_m^{2-n^*} \cdot d_h^{n^*}) / (8^{n^*-1} \cdot K^*)$  [10].

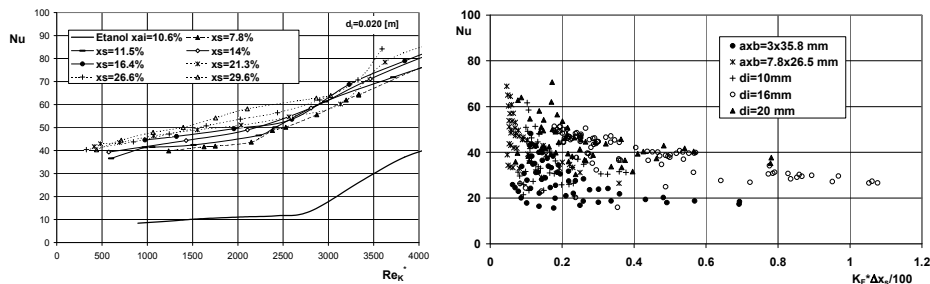
Należy zauważyć, że szczególnie w przypadku przepływu laminarnego w wyniku intensywnego wytapiania lodu na ściankach kanałów obserwowana jest istotna zmiana właściwości fizycznych zawiesiny lodowej w przekroju poprzecznym przepływu. Przez analogię do procesów wymiany ciepła cieczy newtonowskich, wpływ niejednorodności właściwości reologicznych zawiesiny w przekroju poprzecznym przepływu na proces wymiany ciepła uwzględniono wprowadzając do zależności (6) iloraz stałych konsystencji  $(K^*(T_f) / K^*(T_w))^y$ .

Pełną postać równania kryterialnego na liczbę Nusselta dla zawiesiny lodowej prezentuje równanie (7)

$$\text{Nu} = A \cdot (\text{Gz}_K)^m \cdot \left( \frac{\Delta x_s \cdot K_F}{100} \right)^n \cdot \left( \frac{d_s}{d_h} \right)^p \cdot \left( \frac{K^*(T_f)}{K^*(T_w)} \right)^y \quad (7)$$

Rysunek 3A przedstawia zależność liczby Nusselta ( $\text{Nu} = \alpha \cdot d_h / \lambda_B$ ) od uogólnionej liczby Reynoldsa wg Kozickiego, dla przepływu przez rurę o średnicy  $d_i = 0,02$  m. Wpływ przemiany fazowej towarzyszącej procesowi wymiany ciepła na wartości liczb Nusselta przedstawiono na rysunku 3B w postaci relacji pomiędzy liczbą Nu oraz wyrażeniem  $\Delta x_s \cdot K_F / 100$ . Malejący charakter funkcji  $\text{Nu}(\Delta x_s \cdot K_F / 100)$  wynika z faktu, iż intensywniejszemu procesowi wytapiania lodu w cieplnym odcinku pomiarowym towarzyszy większy spadek zawartości lodu  $x_s$  w punkcie pomiarowym w strefie przyściennej, co powoduje mniejsze współczynniki przewodzenia ciepła zawiesiny.





Rys. 3. Zmiany liczb Nu w obszarze laminarnym: A)  $Nu(Re_K^*)$  dla średnicy  $d_i = 0,02$  m; B)  $Nu(\Delta x_s \cdot K_F/100)$  dla wszystkich badanych przekrojów przepływu

Fig. 3. Variation of the Nu-number for the laminar flow:

A)  $Nu(Re_K^*)$  for tube diameter  $d_i = 0,02$  m, B)  $Nu(\Delta x_s \cdot K_F/100)$  for pipes and rectangular channels

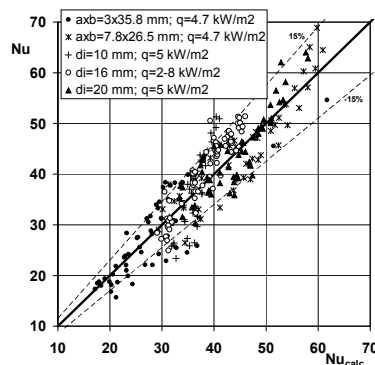
W tabeli 2 zestawiono wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych wartości współczynników  $A$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $y$  dla badanych przekrojów.

Tabela 2

**Eksperymentalnie wyznaczone współczynniki w równaniu (7)**

Przekrój poprzeczny	A	m	n	p	y	Zakres stosowalności
rura	2,52	0,11	-0,10	-0,35	0,052	$3\% < x_s < 30\%$ $200 < Re_K < 2100$
prostokątny szczelinowy	3,66	0,16	-0,28	-0,12	0,16	$5,6\% < x_s < 30\%$ $30 < Re_K < 2300$

Właściwości fizyczne zawiesiny lodowej konieczne do wyznaczenia z zależności (7) liczby Nu zawarto w pracach [1], [6]. Zależności umożliwiające określanie właściwości fizycznych zawiesiny lodowej etanolu przedstawiono w pracy [1].



Rys. 4. Porównanie zmierzonych i obliczonych wg. zależności (7) i tabeli 2 liczb Nu

Fig. 4. Comparison of the measured and calculated Nusselt numbers



Porównanie zmierzonych i obliczonych liczb Nusselta za pomocą zależności (7) i parametrów zawartych w tabeli 2, dla wszystkich badanych przekrojów przedstawiono na rysunku 4.

## 5. Wnioski

W badanym zakresie pomiarowym zmierzone wartości współczynników przejmowania ciepła zmieniają się w zakresie 1000 – 6200 W/(m<sup>2</sup>K) dla przepływu przez rury oraz od 1200 – 7200 W/(m<sup>2</sup>K) dla przepływu przez kanały o przekrojach prostokątnych. Dla tych samych udziałów masowych lodu, prędkości średnich oraz charakterów ruchu współczynniki przejmowania ciepła uzyskiwane dla kanałów o przekrojach prostokątnych ( $d_h = 5,5; 12$  mm) były większe niż w przypadku przepływu przez rury ( $d_h = 10, 16, 20$  mm). Było to spowodowane efektem wlotowym oraz intensywniejszym zrywaniem warstwy przyściennej w przypadku kanałów o mniejszych minimalnych wymiarach geometrycznych charakteryzujących przekrój przepływu. W obszarze laminarnym dla ponad 80% punktów pomiarowych, rozbieżność obliczanych z własnych zależności kryterialnych i zmierzonych wartości współczynników przejmowania ciepła są mniejsze niż 15 %. Zależności te w odróżnieniu od innych znanych z literatury uwzględniają wpływ właściwości reologicznych zawiesiny lodowej, ich zmiany w przekroju poprzecznym oraz oddziaływania przemiany fazowej na wartości współczynników przejmowania ciepła. Uzależnienie liczby Nusselta od uogólnionej liczby Reynoldsa wg Kozickiego, przy spełnieniu innych warunków podobieństwa, pozwala na stosowanie proponowanej zależności dla płynów nie będących cieczami Bingham.

## Oznaczenia

$c_p$	– ciepło właściwe	[J/(kgK)]
$d$	– średnica	[m]
$h$	– entalpia właściwa	[J/kg]
$K_F$	– liczba przejścia fazowego $K_F = r / (c_{pB} \cdot \Delta T)$	
$K^*$	– stała konsystencji,	[Ns <sup>n</sup> /m <sup>2</sup> ]
$L, L_{Heat}$	– długość rury, długość cieplnego odcinka pomiarowego	[m]
$\dot{m}$	– strumień masy	[kg/s]
$n^*$	– charakterystyczny wskaźnik płynięcia $n = d(\ln\tau_w) / d(\ln\Gamma)$	
$\dot{q}$	– gęstość strumienia ciepła	[W/m <sup>2</sup> ]
$T, T_f, T_w$	– temperatura, średnia temperatura masowa, temperatura ściany	[K]
$w_m$	– prędkość przepływu	[m/s]
$x_a, x_s$	– stężenie początkowe roztworu cieczy nośnej, udział masowy lodu	[%]
$\alpha$	– współczynnik przejmowania ciepła	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$\lambda$	– współczynnik przewodzenia ciepła	[W/(m·K)]
$\mu_p$	– dynamiczny współczynnik lepkości plastycznej	[Pa·s]
$\rho$	– gęstość	[kg/m <sup>3</sup> ]

## Literatura

- [1] Niezgoda-Żelasko B.: *Wymiana ciepła i opory przepływu zawiesiny lodowej w przewodach*, Monografia 334, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.
- [2] Madejski J.: *Teoria wymiany ciepła*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1998.
- [3] Egolf P.W., Kitanovski A., Ata-Caesar D., Stamatiou E., Kawaji M., Bedecarrats J.P., Strub F.: *Thermodynamics and heat transfer of ice slurries*, International Journal of Refrigeration **28**, 2005, 51-59.
- [4] Ayel V., Lottin O., Peerhossaini H.: *Rheology, flow behaviour and heat transfer of ice slurries: a review of the state of the art*, International Journal of Refrigeration **26**, 2003, 95-107.
- [5] Stamatiou E., Kawaji M.: *Thermal and flow behavior of ice slurries in a vertical rectangular channel. Part I: Local distribution measurements in adiabatic flow*, International Journal of Heat and Mass Transfer **48**, 2005, 3527-3543.
- [6] Stamatiou E., Kawaji M.: *Thermal and flow behavior of ice slurries in a vertical rectangular channel. Part II: Forced convective melting heat transfer*, International Journal of Heat and Mass Transfer **48**, 2005, 3544-3559.
- [7] Niezgoda-Żelasko B.: *Heat transfer of ice slurries flows in tubes*, International Journal of Refrigeration **29**, 2006, 437-450.
- [8] Charunyakorn P., Sengupta S., Roy S.K.: *Forced convective heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: flow in circular ducts*, International Journal of Heat Mass Transfer **34**, 1991, 819-833.
- [9] B. Niezgoda-Żelasko, J. Żelasko: *Generalized non-Newtonian flow of ice-slurry*, Chemical Engineering and Processing **46**, 2007, 895-904.
- [10] Kozicki W., Chou C.H., Tiu C.: *Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape*, Chemical Engineering Science **21**, 1966, 665-679.