

BEATA NIEZGODA-ŻELASKO
WOJCIECH ZALEWSKI

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Przepływ zawiesiny lodowej w przewodach – obszar badań naukowych

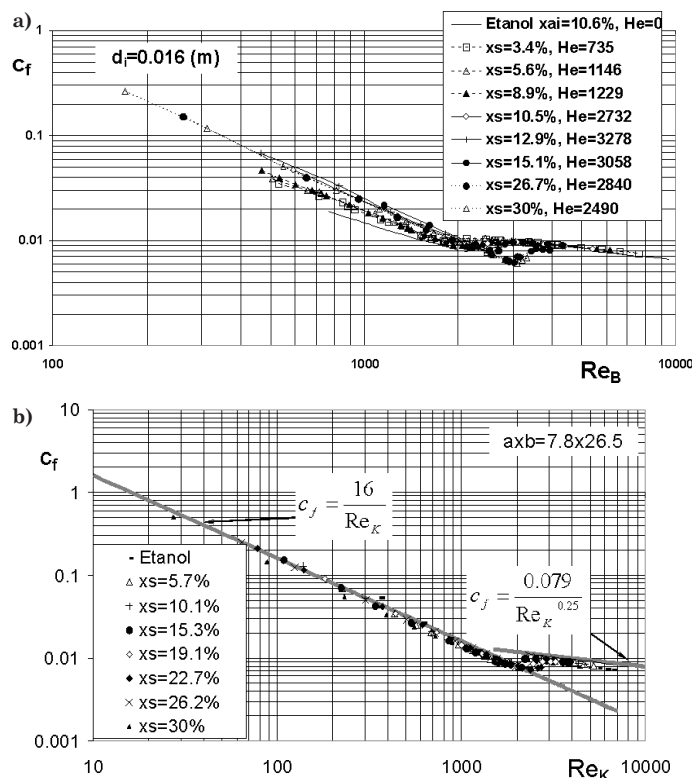
Wprowadzenie

Zawiesiny lodowe należą do grupy chłodziw wykorzystywanych w technice chłodniczej i klimatyzacyjnej do chłodzenia w zakresie temperatur ($-30 \pm 0^\circ\text{C}$). Pod względem reologicznym wykazują one cechy cieczy nienewtonowskich (*Binghama*, *Ostwald-de Waele*, *Cassona*). Właściwości cieplne zawiesiny lodowej pozwalają wykorzystywać ją jako efektywny nośnik ciepła oraz jako medium akumulujące ciepło. Niniejsza praca stanowi przegląd badań związanych z procesami przepływowymi i wymianą ciepła zawiesiny lodowej, utworzonej na bazie wodnego roztworu alkoholu etylowego, zachodzącymi w przewodach o różnej geometrii, prowadzonych w latach 2002–2008 w Zakładzie Chłodnictwa i Klimatyzacji Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej.

Adiabatyczny przepływ zawiesiny lodowej przez przewody

Zakres badań doświadczalnych obejmował pomiary spadku ciśnienia podczas przepływu zawiesiny lodowej przez przewody proste o przekroju kołowym (rury) i prostokątnym oraz przez łuki i kolana [1–3]. Przebieg rurowych krzywych płynięcia pozwolił zidentyfikować reologicznie zawiesinę lodową 10,6% roztworu etanolu ($0 < x_s \leq 30\%$, średni wymiar kryształków lodu $d_s = 0,1\text{--}0,15\text{ mm}$) jako ciecz *Binghama*, dla której wyznaczono graniczne naprężenia styczne τ_p oraz dynamiczne współczynniki lepkości plastycznej μ_p [2]. Opory przepływu zawiesiny lodowej przez proste odcinki przewodów ($\Delta p = 2c_f L \rho_B w_m^2 / d_h$) mogą być określane w obszarze przepływu laminarnego tak jak dla cieczy *Binghama* za pomocą metody *Hedströma* [2], według której współczynnik oporów *Fanninga* c_f jest funkcją liczb *Reynoldsa* i *Hedströma* (Rys. 1a). Wprowadzenie uogólnionej postaci liczby *Reynoldsa* według *Kozickiego* [4] ($Re_K = (\rho_B w_m^{2-n} d_h^n) / (8^{n-1} K^*)$) dla dowolnego przekroju poprzecznego przewodu pozwala na sprowadzenie przepływu cieczy nienewtonowskiej (*Binghama*) do przepływu cieczy, dla której współczynnik oporów *Fanninga* c_f można wyznaczyć z zależności *Fanninga* (obszar przepływu laminarnego) oraz zależności *Dodge'a-Metznera* [3] lub *Blasiusa* (obszar przepływu turbulentnego). Zależności *Fanninga* i *Blasiusa* mogą być stosowane zarówno dla przepływu przez przewody o przekroju kołowym (Rys. 1a) jak i prostokątnym (Rys. 1b).

Na podstawie analizy wyników pomiarów stwierdzono, że utrata stabilności przepływu laminarnego nie występuje przy stałej wartości liczby *Reynoldsa* Re_B , ale przesuwają się w kierunku jej większych wartości dla zawiesin lodowych o większych udziałach masowych lodu (Rys. 1a). Obszar przejścia z zakresu laminarnego w przejściowy mieścił się w przedziale



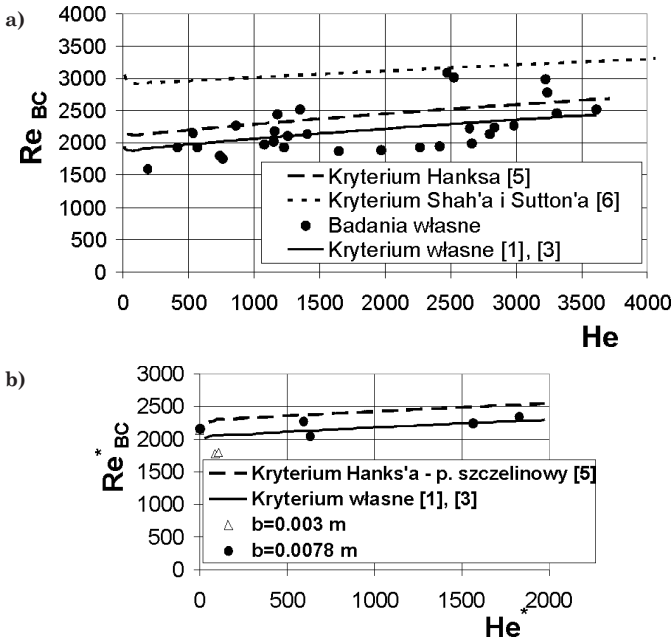
Rys. 1. a) zależność współczynnika oporów *Fanninga* c_f od liczb Re_B i He dla $d_i = 0.016\text{ m}$; b) współczynnik oporów *Fanninga* zawiesiny lodowej w funkcji uogólnionej liczby *Reynoldsa* według *Kozickiego* – przekrój prostokątny: $a \times b = 0,078 \times 0,0265\text{ m}$

liczb *Reynoldsa* $Re_B = 1800\text{--}3000$. Na rys. 2 przedstawiono wyznaczone eksperymentalnie krytyczne wartości liczb *Reynoldsa* (Re_{BC}) dla przepływu przez przewody o przekroju kołowym (Rys. 2a) i prostokątnym (Rys. 2b).

Wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły na modyfikację kryterium *Hanksa* zarówno dla przepływu przez rury jak również przez przewody o przekrojach prostokątnych. Szersze rozważania dotyczące kryteriów zmiany charakteru ruchu dla uogólnionego oraz wielofazowego przepływu zawiesiny lodowej były przedmiotem prac [1, 3, 5].

Wymiana ciepła podczas przepływu zawiesiny lodowej

Proces wymiany ciepła z udziałem zawiesiny lodowej można określić jako wymianę ciepła w warunkach konwekcji wymuszonej cieczy nienewtonowskiej podlegającej przemianie fazowej. Badania wymiany ciepła zostały przeprowadzone w warunkach stałej gęstości strumienia ciepła ($2000 \leq \dot{q} \leq 8000\text{ W/m}^2$) dla unikalnie długich cieplnych odcinków po-



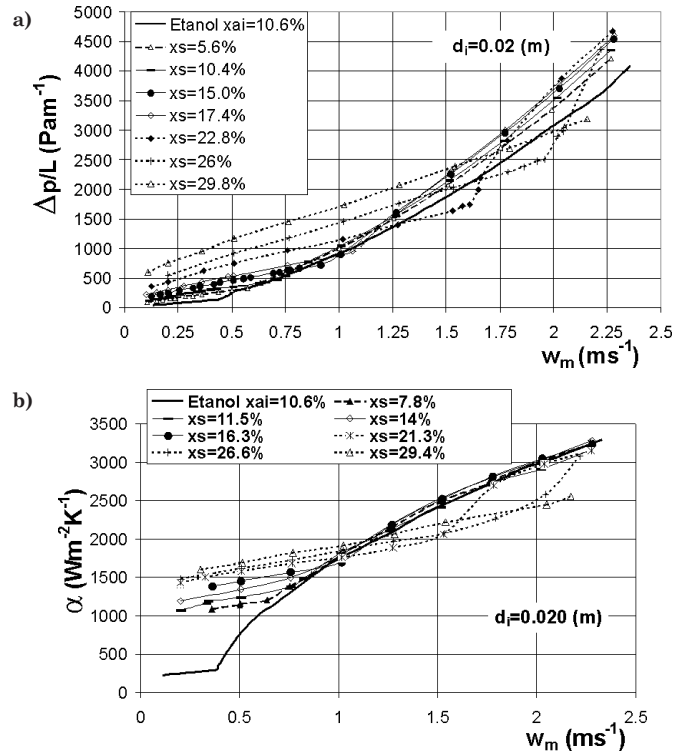
Rys. 2. Zmierzone i obliczone krytyczne wartości liczby Reynoldsa dla zawiesiny lodowej: a) przepływ przez rury; b) przepływ przez przewody o przekroju prostokątnym i szczelinowym

miarowych ($142 \leq L/d_h \leq 150$ – przepływ przez rury, $118 \leq L/d_h \leq 127$ – przepływ przez przewody o przekroju prostokątnym).

Analizując zmiany współczynnika przejmowania ciepła zawiesiny lodowej w funkcji prędkości przepływu można wskazać na pewne analogie do zmian oporów przepływu. *Efekt przebicia* zaobserwowany w procesie wymiany pędu (spadek oporów przepływu zawiesiny lodowej poniżej oporów cieczy nośnej – etanolu o stężeniu początkowym $x_a = 10,6\%$ w temperaturze $-4,5^\circ\text{C}$) występuje również w procesie wymiany ciepła. Dokładniej zagadnienie to ilustruje rys. 3. W obszarze przepływu laminarnego obecność cząstek stałych powoduje 2–5,7-krotny wzrost współczynnika przejmowania ciepła w stosunku do współczynników przejmowania ciepła cieczy nośnej (Rys. 3b). Z drugiej zaś strony istnieją prędkości, przy których dla zawiesin o zawartości lodu $x_s > 10$ –20% współczynniki przejmowania ciepła są niższe niż współczynniki przejmowania ciepła cieczy nośnej. W obszarze przepływu turbulentnego zaobserwowany wzrost współczynnika przejmowania ciepła zawiesiny w stosunku do etanolu wynosił 20–30%.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że w rozważanym przedziale zmian gęstości strumienia ciepła ($2000 \leq \dot{q} \leq 8000 \text{ W/m}^2$) ma ona znikomą wpływ na wartość współczynnika przejmowania ciepła [1]. W procesie konwekcyjnego topnienia kryształków lodu zawiesiny lodowej w obszarze przepływu laminarnego współczynniki przejmowania ciepła determinowane są zjawiskami konwekcyjnymi ($Nu = f(Gr)$), przemianą fazową ($Nu = f(\Delta x_s r / (c_{pB}(T_w - T_f)))$), efektem mikrokonwekcji ($Nu = f(d_s / d_h)$) oraz zmianą właściwości fizycznych zawiesiny w przekroju poprzecznym przepływu [1, 6, 7].

W obszarze przepływu turbulentnego obserwowano dominujący wpływ zjawisk konwekcyjnych na zmiany wartości współczynnika przejmowania ciepła ($Nu = f(Pe, d_s / d_h)$). Na podstawie otrzymanych wyników badań opracowano zależności kryterialne służące do wyznaczania lokalnych współczynników przejmowania ciepła dla przepływu laminarnego i tur-



Rys. 3. Analogia pomiędzy zmiennością funkcji $\Delta p/L$ i α w funkcji $(w_m)_{xs}$ dla średnicy $d_i = 0,02 \text{ m}$: a) zależność $\Delta p/L$ (w_m) $_{xs}$; b) zależność α (w_m) $_{xs}$

bulentnego różnych zawiesin podlegających procesowi topnienia w kanałach o różnych przekrojach poprzecznych przepływu [7]. Jednak w obliczeniach inżynierskich stosowanie zależności wymagających wyznaczania stałej konsystencji wg *Kozickiego* K^* i wskaźnika płynięcia n^* jest dość kłopotliwe. Dlatego w obliczeniach projektowych można stosować zależności na średnie współczynniki przejmowania ciepła (1) i (2), odpowiednio dla obszaru laminarnego i turbulentnego [8, 9]:

$$Nu_{m-L} = 2,25 Pe_m^{0,28} \left(0,728 + \left(\frac{x_{sm}}{100} \right)^{1,71} \right) \quad (1)$$

$$Nu_{m-T} = 0,00246 Pe_m^{0,75} \left(2,774 + \left(\frac{x_{sm}}{100} \right)^{0,108} \right) \quad (2)$$

Wynikiem badań poświęconych przepływowi, wymianie ciepła oraz tworzonym przez zawiesinę lodową strukturom przepływu jest wskazanie zalecanego, z punktu widzenia minimalnych oporów przepływu i maksymalnych współczynników przejmowania ciepła, obszaru zmian prędkości średniej i udziału masowego lodu [1, 9]. Udział objętościowy i średnią prędkość przepływu zawiesiny należy dobierać tak, aby przepływ realizowany był w laminarnym obszarze przepływu homogenicznego.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono w bardzo dużym skrócie zakres badań naukowych dotyczących procesów cieplnych i przepływowych z udziałem zawiesiny lodowej powstałej na bazie wodnego roztworu etanolu, prowadzonych w ostatnich latach przez jej autorów. Całkowicie pominięto w niej badania związane z przepływem zawiesiny lodowej przez łuki i kolana, które są przedmiotem odrębnej publikacji. Dotychczas

przeprowadzone badania można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej grupy należy zaliczyć prace, w których zawiesina lodowa traktowana jest wyłącznie jako ciecz *Binghama*. Drugą grupę stanowią prace traktujące badane procesy z punktu widzenia uogólnionego przepływu cieczy nienewtonowskiej. Poza powyżej poruszonymi zagadnieniami istotną część badań stanowiły prace poświęcone modelowaniu procesów przepływowych z wykorzystaniem modeli jedno- i wielofazowych oraz modelowaniu procesów topnienia w zawieszinie lodowej z zastosowaniem metody *entalpia-porowatość*. Mając na względzie praktyczne wykorzystanie wyników badań zajmowano się również metodami obliczeniowymi wymienników ciepła i instalacji zasilanych zawiesiną lodową oraz aspektami technicznymi, technologicznymi i ekonomicznymi, związanymi ze stosowaniem zawiesin lodowych.

Ważniejsze oznaczenia

c_f – współczynnik oporu *Fanninga*,
 K^* – stała konsystencji wg *Kozickiego* [4],
 L – długość rury, odcinka pomiarowego, [m],
 n^* – charakterystyczny wskaźnik płynięcia,
 p – ciśnienie, [Pa],

w_m – średnia prędkość przepływu, [m/s],
 x_a – stężenie cieczy nośnej, [%],
 x_{sm} – średni udział masowy lodu, [%],
 Pe_m – średnia wartość liczby *Peckleta*,
 Re_B – liczba *Reynoldsa* dla płynu *Binghama*,
 Re_K – liczba *Reynoldsa* wg *Kozickiego*[4].

LITERATURA

1. *B. Niezgoda-Żelasko*: Wymiana ciepła i opory przepływu zawiesiny lodowej w przewodach, Monografia 334, Wyd. Pol. Krakowskiej, 2006.
2. *B. Niezgoda-Żelasko, W. Zalewski*: Int. Journal of Refrigeration **29**, nr 3, 418 (2006).
3. *B. Niezgoda-Żelasko, J. Żelasko*: Chem. Eng. and Processing. **46**, nr 10, 895 (2007).
4. *W. Kozicki, C.H. Chou, C. Tiu*: Chem. Eng. Science. **21**, nr 8, 665 (1966).
5. *B. Niezgoda-Żelasko*: Trans. of the Inst. of Fluid-Flow Machinery 118 (2006).
6. *B. Niezgoda-Żelasko*: Int. Journal of Refrigeration **29**, nr 3, 437 (2006).
7. *B. Niezgoda-Żelasko, J. Żelasko*: Experimental Thermal and Fluid Science **32**, nr 8, 1597 (2008).
8. *W. Zalewski, B. Niezgoda-Żelasko, M. Litwin, J. Żelasko*: Sprawozdanie z realizacji PB 4T10B01123, Pol. Krakowska, Kraków, 2005.
9. *B. Niezgoda-Żelasko, W. Zalewski, J. Żelasko*: Mat. Konf. „XXXIII Dni Chłodnictwa”, Poznań, 2007.