

ŁUKASZ MIKA

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Badania oporów przepływu lodu zawiesinowego – opory miejscowe na przewężeniach (redukcjach) średnicy rurociągu

Wprowadzenie

W ostatnich kilku latach coraz szersze zastosowanie znajduje w technice chłodniczej i klimatyzacyjnej lód zawiesinowy (zawiesina lodowa) jako chłodziwo w pośrednich systemach chłodzenia. Jest on stosowany w systemach klimatyzacyjnych budynków, kopalń, w instalacjach chłodniczych supermarketów i browarów, w przemyśle mleczarskim, itp.

Lód zawiesinowy jest to mieszanina drobinek lodu (o wymiarach do 0,5 mm, sporadycznie nieco większych) i cieczy (najczęściej wodnego roztworu alkoholu etylowego) z dodatkiem środka antykorozyjnego (inhibitora). Wytwarzany jest on w specjalnych urządzeniach, zwanych wytwornicami lodu zawiesinowego.

Właściwości przepływowe lodu zawiesinowego w dużym stopniu zależą od udziału masowego drobinek lodu:

- przy zawartości do 20% drobinek lodu jest to płyn o cechach czystej wody,
- przy zawartości do 40% drobinek lodu mieszanina jest nadal płynna, lecz ma znacznie większą od wody lepkość,
- przy zawartości ponad 40% mieszanina wygląda jak mokry śnieg i ze względu na trudności transportowe nie jest stosowana w chłodnictwie,
- przy zawartości około 90% mieszaninę traktuje się jako zwykły lód.

Poważną wadą lodu zawiesinowego jest jego skłonność do zbrylania się i zachodzi konieczność dbania o homogenizację mieszaniny [1]. W porównaniu z solankami lub wodą lód binarny posiada wiele zalet. Największą zaletą jest duża pojemność cieplna na skutek utajonego ciepła topnienia lodu. Lód zawiesinowy charakteryzuje się także znacznie wyższymi współczynnikami wnikania ciepła.

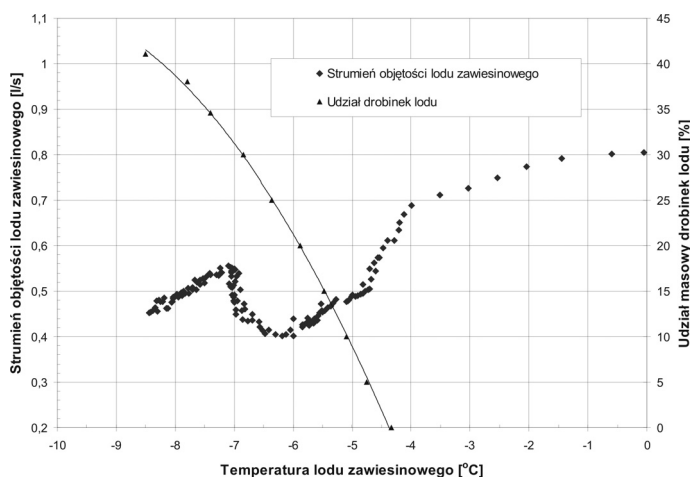
Kolejną zaletą lodu zawiesinowego są korzystne właściwości pod względem oporów przepływu. Mieszaninę można uważać za tzw. płyn *Binghama*, którego cechą charakterystyczną jest brak występowania, w klasycznej postaci, przepływu laminarnego bądź turbulentnego. Przepływ tego płynu można nazwać tłokowym, czyli niemal w całym przekroju rurociągu prędkość płynu jest jednakowa. Alternatywnie można by traktować przepływ lodu zawiesinowego jako przepływ dwufazowy (ciało stałe – ciecz).

Istnieje cały szereg instalacji z lodem zawiesinowym działających w Danii, Niemczech, Szwajcarii, Japonii, a także w krajach afrykańskich, gdzie urządzenia te wykorzystuje się do ochładzania powietrza wentylacyjnego w kopalniach. W Japonii lód zawiesinowy stosowany jest w dużych systemach klimatyzacyjnych. W Europie instalacje wykorzystu-

jące lód binarny jako chłodziwo pośredniczące stosuje się w supermarketach, zakładach mięsnych, browarach [2].

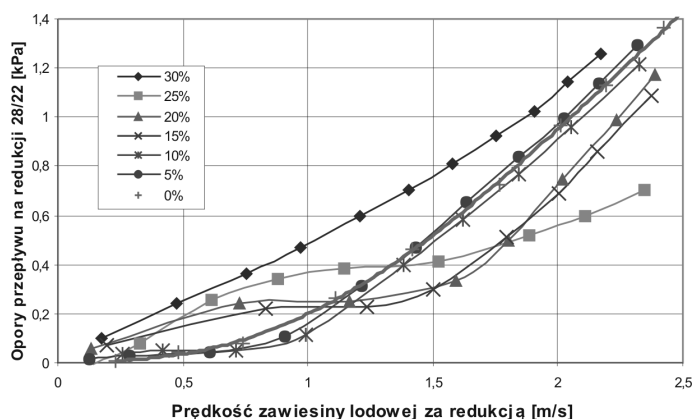
Efekt „przebiecia”

Podczas prac badawczych wykonywanych przez autora w latach 2003–2004 udokumentowano efekt samoistnego wzrostu strumienia objętości przepływającego lodu zawiesinowego w instalacji (efekt przebiecia krzywych oporów cieczy nośnej przez krzywe oporów zawiesiny lodowej) przy zawartościach kryształków lodu powyżej 25% oraz dużych prędkościach przepływu [3, 4]. Badania przeprowadzono w kilku różnych instalacjach dystrybucyjnych z lodem zawiesinowym. Rys. 1 przedstawia zależność strumienia objętości lodu zawiesinowego oraz udziału masowego drobinek lodu w funkcji temperatury zawiesiny w jednej z instalacji.

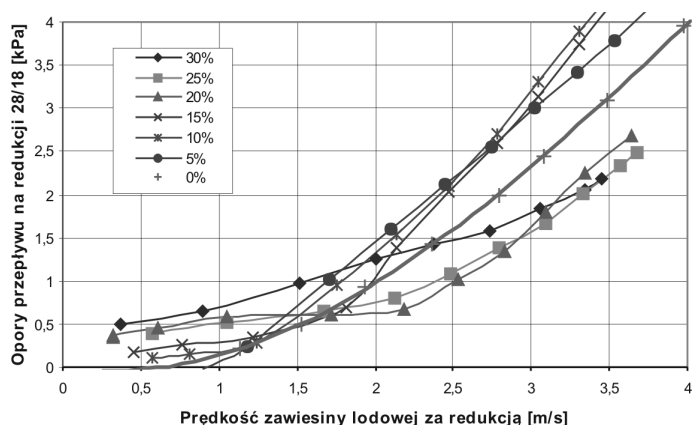


Rys. 1. Zależność strumienia objętości lodu zawiesinowego w instalacji pierwszej oraz udziału masowego drobinek lodu w funkcji temperatury [3]

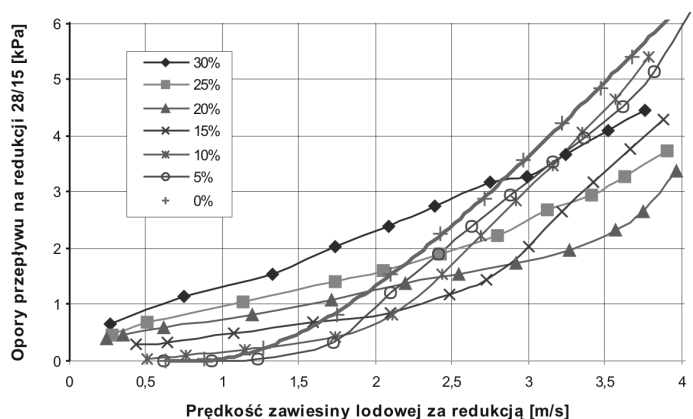
Zaobserwowano, że zjawisko zmniejszania się oporów przepływu zaczyna występować we wszystkich instalacjach od temperatury poniżej $-6,5^{\circ}\text{C}$, to jest dla udziału drobinek lodu powyżej 26%, a swoje ekstremum lokalne (minimum) ma w okolicy temperatury $-7,1^{\circ}\text{C}$. Mimo, że efekt ten ma w różnych instalacjach z zawiesiną lodową podobny charakter, to skala zjawiska mocno zależy od rodzaju elementów użytych w konkretnej w instalacji, takich jak odcinki proste (wyniki badań opublikowane w pracy [4]), redukcje, trójniki, zawory, rozdzielacze itp.



Rys. 2. Opory przepływu lodu zawiesinowego na redukcji średnicy rurociągu 28/22 mm w zależności od prędkości zawiesiny dla różnych udziałów drobinek lodu



Rys. 3. Opory przepływu lodu zawiesinowego na redukcji średnicy rurociągu 28/18 mm w zależności od prędkości zawiesiny dla różnych udziałów drobinek lodu



Rys. 4. Opory przepływu lodu zawiesinowego na redukcji średnicy rurociągu 28/15 mm w zależności od prędkości zawiesiny dla różnych udziałów drobinek lodu

Opory przepływu na redukcjach średnicy rurociągu

Aby dokładnie opisać efekt przebiecia krzywych oporów cieczy nośnej przez krzywe oporów zawiesiny lodowej postanowiono poddać badaniom doświadczalnym wszystkie najczęściej stosowane elementy armatury rurociągu. W dotych-

czas przeprowadzonych przez autora badaniach doświadczalnych dotyczących wyznaczenia miejscowych oporów przepływu wykorzystano następujące redukcje średnicy miedzianego rurociągu: 28/22 mm, 28/18 mm oraz 28/15 mm. W badaniach tych zakres masowego strumienia przepływu zawiesiny lodowej zmienił się od 0 do 0,7 kg/s (maksymalnie), a udziały masowe drobinek lodu w poszczególnych mieszaninach wynosiły: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%. Na rys. 2–4 przedstawiono opory przepływu lodu zawiesinowego na trzech różnych redukcjach średnicy rurociągu: 28/22 mm (Rys. 2), 28/18 mm (Rys. 3) oraz 28/15 mm (Rys. 4) w funkcji prędkości mieszaniny za redukcją rurociągu.

Wnioski

Zawiesiny lodowe o różnych udziałach drobinek lodu wykazują zmienną, krytyczną wartość liczby *Reynoldsa*. Dla mieszanin o większych udziałach drobinek lodu (30%, 25%, 20%) utrata stabilności przepływu laminarnego występuje przy wyższych prędkościach przepływu, najczęściej powyżej 1,8–2,5 m/s, dla których liczba *Reynoldsa* ma wartość z zakresu 1940 do 2820. W przypadku zawiesiny lodowej o mniejszych udziałach lodu (15%, 10%, 5%) charakter ruchu zmienia się przy niższych prędkościach przepływu, wynoszących 0,7–2,2 m/s, którym odpowiadają wartości krytycznej liczby *Reynoldsa* od 2360 do 3150. Według badań dotychczas przeprowadzonych przez autora, dla lodu zawiesinowego o zawartości drobinek od 5–30% krytyczna liczba *Reynoldsa* znajduje się w zakresie od 1940 do 3150.

Wraz ze wzrostem prędkości przepływu obserwuje się efekt przebiecia krzywych oporu cieczy nośnej krzywymi oporów lodu zawiesinowego. Efekt przebiecia dla mieszanin o różnych udziałach drobinek lodu występuje przy różnych prędkościach (im wyższa zawartość drobinek lodu tym wyższa prędkość). Wyjątek stanowi mieszanina z 30% udziałem drobinek lodu przy przepływie przez redukcję 28/22 mm, która została jednak zbadana dla mniejszego zakresu zmienności prędkości zawiesiny. Dla tej 30% mieszaniny przy prędkości 2,2 m/s liczba *Reynoldsa* wynosi 2820.

Przy niskich prędkościach przepływu (do 1,0–1,5 m/s) zawiesiny lodowe o największych udziałach drobinek lodu (30%, 25%, 20% i 15%) wykazują największe opory przepływu na wszystkich redukcjach. Opory przepływu lodu zawiesinowego są w tym zakresie kilkukrotnie większe od oporów przepływu cieczy nośnej (wodnego roztworu alkoholu etylowego) bez drobinek lodu.

Zbliżone wartości oporów przepływu na redukcji 28/22 mm mają zawiesiny lodowe o udziałach drobinek lodu 0%, 5% oraz 10%, a na redukcji 28/18 mm zawiesiny o udziałach drobinek lodu 5%, 10% i 15%.

LITERATURA

1. M. Kauffeld: Chłodnictwo & Klimatyzacja, nr 5 (1999).
2. E. Mika, W. Zalewski: Inż. Ap. Chem., 40, nr 4, 15 (2001).
3. E. Mika: Badania lodu binarnego jako chłodziwa w pośrednich systemach chłodzenia, Praca doktorska, Kraków (2004).
4. B. Niezgoda-Zelasko: Wymiana ciepła i opory przepływu zawiesiny lodowej w przewodach, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2010.