

Joanna SROKA, Stanisław WITCZAK

e-mail: j.sroka@doktorant.po.edu.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Analiza metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla w rurach poziomych

### Wstęp

Wycofywanie czynników chłodniczych z grup CFC i HCFC powoduje konieczność znalezienia nowych proekologicznych czynników, które znajdują zastosowanie w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych. Proponowane proekologiczne czynniki chłodnicze można podzielić na dwie grupy: czynniki syntetyczne oraz czynniki naturalne. Jednym z proponowanych naturalnych czynników chłodniczych jest dwutlenek węgla.

Istniejące metody obliczeniowe wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła były opracowane dla powszechnie do tej pory wykorzystywanych syntetycznych czynników chłodniczych.

W pracy dokonano weryfikacji możliwości wykorzystania istniejących metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła dla warunków wrzenia dwutlenku węgla w rurach poziomych.

### Literaturowe dane doświadczalne

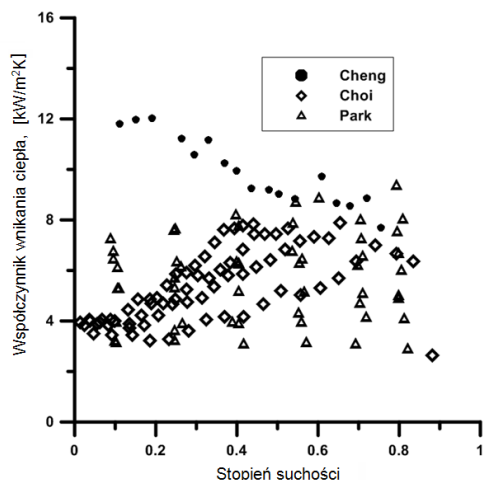
Zebrano literaturowe dane doświadczalne dotyczące wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla, w różnych warunkach przepływowych i cieplnych. Na ich podstawie można stwierdzić, że charakter zmian wartości współczynnika wnikania ciepła dwutlenku węgla jest podobny do charakteru odpowiednich zmian występujących także dla syntetycznych czynników chłodniczych.

Cheng [2006] przeprowadził badania dla średnicy  $d = 6$  mm, gęstości strumienia masy  $g_T = 340$  kg/(m<sup>2</sup>K), gęstości strumienia ciepła  $q = 20$  kW/m<sup>2</sup> oraz temperatury  $t = 5^\circ\text{C}$ .

Choi [2007] badał wymianę ciepła stosując rurę o średnicy  $d = 1,5$  mm,  $g_T = (300 \div 600$  kg/(m<sup>2</sup>K)),  $q = 10$  kW/m<sup>2</sup> i  $t = -5^\circ\text{C}$ .

Park [2007] natomiast wykonał badania dla następujących warunków:  $d = 6,1$  mm,  $g_T = 100 \div 400$  kg/(m<sup>2</sup>K),  $q = 5 \div 15$  kW/m<sup>2</sup> oraz  $t = -15^\circ\text{C}$ .

Na rys. 1 przedstawiono przykładowe zmiany wartości współczynnika wnikania ciepła w zależności od stopnia suchości dla różnych warunków cieplno-przepływowych uzyskanych przez różnych autorów.



Rys. 1. Eksperymentalne wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla w kanałach poziomych

### Przegląd metod obliczeniowych

Istnieje wiele metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła dla wrzenia czynników chłodniczych w rurach poziomych. Większość metod obliczeniowych opracowana została dla wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia syntetycznych czynników chłodniczych. Występuje jednak niedobór metod obliczeniowych dla naturalnych czynników chłodniczych. Wykorzystanie istniejących metod obliczeniowych do wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla w kanałach poziomych wymaga sprawdzenia. Metody podane w literaturze dotyczą zarówno zakresu odparowywania konwekcyjnego, jak i zakresu wrzenia pęcherzykowego. Istnieją również metody, w których stosuje się superpozycję odparowywania konwekcyjnego oraz wrzenia pęcherzykowego.

Do analizy wybrano dwie przykładowe metody obliczeniowe zaproponowane dla wrzenia w rurach poziomych.

**Metoda Liu i Wintertona** [Witczak, 2013] jest jedną z często stosowanych metod obliczeniowych, a współczynnik wnikania ciepła oblicza się z zależności

$$\alpha_{2F} = \sqrt{(E\alpha_c)^2 + (S\alpha_w)^2} \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha_{co}$  wyznacza się z równania Dittusa-Boeltera

$$\alpha_{co} = 0,023 \frac{\lambda_c}{D} \text{Re}_{co}^{0,8} \text{Pr}_c^{0,4} \quad (2)$$

$$\text{Re}_{co} = \frac{g_T D}{\lambda_c} \quad (3)$$

Współczynnik wnikania ciepła dla wrzenia pęcherzykowego w dużej objętości  $\alpha_w$  oblicza się z zależności Forstera-Zubera

$$\alpha_w = 55 P_{cr}^{0,12} (-\log P_{cr})^{-0,55} M^{-0,5} q^{0,67} \quad (4)$$

gdzie:

$M$  – masa cząsteczkowa,

$P_{cr}$  – ciśnienie zredukowane,

$q$  – gęstość strumienia ciepła, [W/m<sup>2</sup>]

Z kolei współczynniki  $E$  i  $S$  oblicza się ze wzorów

$$E = \left[ 1 + x \text{Pr}_c \left( \frac{\rho_c}{\rho} - 1 \right) \right]^{-0,35} \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{1 + 0,05 E^{0,1} \text{Re}_{co}^{0,16}} \quad (6)$$

**Metoda Kenninga i Coopera** [Dutkowski, 2011] jest następną opisywaną w literaturze metodą stosowaną do wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych w rurach poziomych. Współczynnik wnikania ciepła wyznacza się z zależności

$$\alpha_{2F} = E\alpha_c \quad (7)$$

gdzie:  $\alpha_c$  oblicza się z równania Dittusa-Boeltera

$$\alpha_c = 0,023 \frac{\lambda_c}{D} \text{Re}_c^{0,8} \text{Pr}_c^{0,4} \quad (8)$$

w którym

$$Re_c = \frac{g_T(1-x)D}{\lambda_c} \quad (9)$$

Współczynnik wzmocnienia  $E$  wyznacza się z równania

$$E = 1 + 1,8 \left( \frac{1}{X_{tt}} \right)^{0,87} \quad (10)$$

w którym  $X_{tt}$  – parametr *Lockharta-Martinellego* określa się z zależności

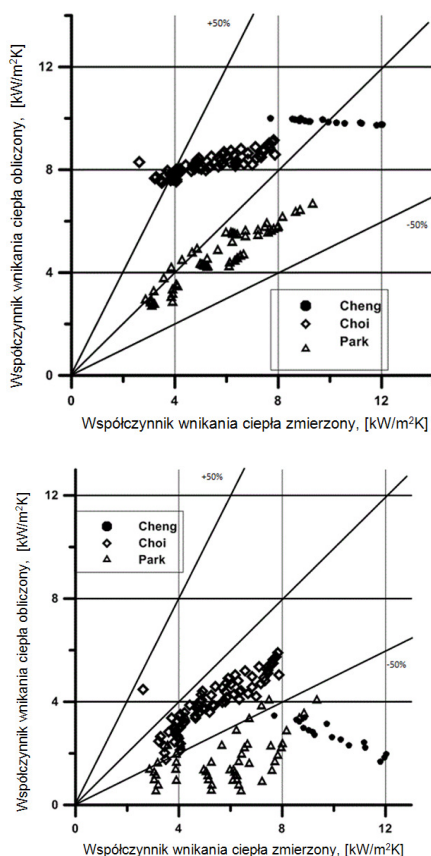
$$X_{tt} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left( \frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,5} \left( \frac{\eta_c}{\eta_g} \right)^{0,1} \quad (11)$$

### Porównanie doświadczalnych wartości współczynnika wnikania ciepła z obliczonymi

Dokonano obliczeń wartości współczynnika wnikania ciepła opisanymi powyżej metodami dla warunków cieplno-przepływowych odpowiadających warunkom doświadczalnym. Następnie porównano wartości wyznaczone doświadczalnie z obliczonymi. Porównanie obliczonych i wyznaczonych doświadczalnie wartości współczynnika wnikania ciepła przedstawiono na rys. 2.

Na tej podstawie dokonano oceny możliwości wykorzystywania wybranych metod obliczeniowych do wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla w kanałach poziomych.

Zestawienie zmierzonych i obliczonych wartości współczynnika wnikania ciepła wskazuje, że dla metody *Liu i Wintertona* (Rys. 2a) większość punktów mieści się w zakresie  $\pm 50\%$ .



Rys. 2. Porównanie wartości wyznaczonych doświadczalnie i obliczonych: a) metodą *Liu i Wintertona* b) metodą *Kenninga i Coopera*

Analiza metody *Kenninga* i *Coopera* pokazuje z kolei, że duża liczba punktów wykracza poza zakres  $\pm 50\%$ . Metoda ta nie może być zatem zastosowana do opisu wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla w rurach poziomych.

Następnie dokonano analizy statystycznej analizowanych metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla w kanałach poziomych. Wyznaczono średnie wartości błędu względnego

$$\overline{\delta\alpha_{2F}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\alpha_{2F,i} \quad (12)$$

oraz średnie wartości odchylenia standardowego

$$\delta(\delta\alpha_{2F}) \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta\alpha_{2F,i} - \overline{\delta\alpha_{2F}})^2 \right]^{0,5} \quad (13)$$

Wyniki obliczeń błędu względnego oraz odchylenia standardowego zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Analiza statystyczna metod obliczeniowych do wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła w kanałach poziomych

Metoda obliczeniowa	$\overline{\delta\alpha_{2F}}$	$\delta(\delta\alpha_{2F})$
<i>Kenning i Cooper</i>	0,45	0,94
<i>Liu i Winterton</i>	0,04	0,39

Wyniki podane w tab. 1 pokazują, że wartości błędu względnego oraz odchylenia standardowego dla metody *Kenninga* i *Coopera* są niezadowalające, a analizowana metoda mało dokładnie opisuje wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla.

Wartość średniego błędu względnego uzyskana dla metody *Liu* i *Wintertona* jest niska. Niestety średnia wartość odchylenia standardowego przewyższa wartości oczekiwane dla warunków wrzenia typowych czynników chłodniczych.

### Wnioski

Spośród analizowanych metod obliczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia dwutlenku węgla w rurach poziomych lepiej sprawdza się metoda *Liu i Wintertona*, jednak rozrzut punktów między wartościami zmierzonymi i obliczonymi jest niezadowalający. Aby umożliwić wykorzystanie metody dla większego zakresu warunków przepływowo-ciepłowniczych konieczne jest opracowanie korekty tej zależności z uwzględnieniem specyfiki wrzenia dwutlenku węgla.

### LITERATURA

Cheng L., Ribatski G., Wojtan L., Thome J.R., 2006. New flow boiling heat transfer model and flow pattern map for carbon dioxide evaporating inside horizontal tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **49**, 4082-4094. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.04.003

Choi K-I, Pamitran A.S., Oh C-Y., 2007. Boiling heat transfer of R-22, R-134a and CO<sub>2</sub> in horizontal smooth minichannels. *Int. J. Refrig.*, **30**, 1336-1346. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2007.04.007

Dutkowski K., 2011. *Wymiana ciepła i opory przepływu czynników jedno- i dwufazowych w minikanalach*. Wyd. Pol. Koszalińskiej, Koszalin

Park C.Y., Hrnjak P.S., 2007. CO<sub>2</sub> and R410A flow boiling heat transfer, pressure drop, and flow pattern at low temperatures in a horizontal smooth tube. *Int. J. Refrig.*, **30**, 166-178. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2006.08.007

Witczak S., 2013. *Wrzenie naturalnych czynników chłodniczych podczas przepływu w kanałach i minikanalach*. Wyd. Politechniki Opolskiej, Opole



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA OPÓRNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY

