

OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ISTNIEJĄCYCH METOD OBLICZENIOWYCH WYZNACZANIA WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA CIEPŁA PODCZAS WRZENIA PROPANU W KANAŁACH POZIOMYCH

Streszczenie

W artykule omówiona została ocena możliwości wykorzystania istniejących metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła, które zostały opracowane dla syntetycznych czynników chłodniczych, w kontekście możliwości ich wykorzystania dla wrzenia propanu w kanałach poziomych. Analizie zostały poddane wybrane, często cytowane w literaturze, metody obliczeniowe w porównaniu z dostępnymi w literaturze wynikami badań eksperymentalnych dla różnych warunków cieplno-przepływowych wrzenia propanu.

WSTĘP

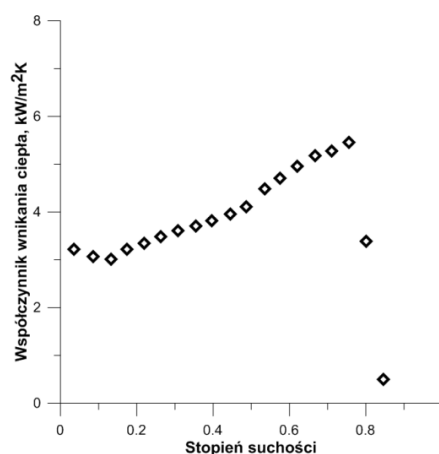
W związku z ogólnosiątkowymi trendami dotyczącymi ochrony środowiska naturalnego, wprowadzane są przepisy wycofujące z użytku związki chlorofluoropochodne. Do związków takich zalicza się powszechnie stosowane w chłodnictwie freony. Jako czynniki mogące je zastąpić w instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych coraz częściej proponowane są naturalne czynniki chłodnicze. Do czynników tych zaliczyć można dwutlenek węgla, amoniak, wodę oraz węglowodory. Wśród tych ostatnich najczęściej wymienia się propan oraz izobutan.

Dla dotychczas stosowanych syntetycznych czynników chłodniczych opracowano wiele metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas ich wrzenia w kanałach poziomych. Występuje natomiast niedobór metod obliczeniowych dla naturalnych czynników chłodniczych. Brak jest również informacji dotyczących możliwości wykorzystania istniejących metod obliczeniowych w kontekście wrzenia naturalnych czynników chłodniczych w parownikach rurowych. Znalezienie metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła dla naturalnych czynników chłodniczych m.in. dla propanu jest istotne w kontekście projektowania parowników urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych przy zastosowaniu tych czynników. Z tego powodu w niniejszej pracy dokonano analizy wybranych, często cytowanych w literaturze ogólnych metod obliczeniowych opracowanych dla wrzenia freonów i wody, pod kątem oceny możliwości ich wykorzystania do określenia wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych.

1. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Tematyka wrzenia naturalnych czynników chłodniczych w parownikach chłodniczych jest nowa, dlatego występuje mało badań eksperymentalnych dotyczących wrzenia propanu w kanałach poziomych. Celem oceny dokładności analizowanych metod obliczeniowych zebrano dostępne w literaturze dane doświadczalne dla wrzenia propanu, które opracowano w formie bazy danych doświadczalnych. Zebrano w niej 490 punktów pomiarowych dla wnikania ciepła podczas wrzenia propanu dla różnych warunków cieplno-przepływowych. W oparciu o zebrane dane stwierdzono, że charakter zmian wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych jest praktycznie taki sam jak podczas wrzenia wody oraz syntetycznych czynników chłodniczych. Na rys.1 przedstawiono przykładowy przebieg wartości

współczynnika wnikania ciepła w zależności od stopnia suchości podczas wrzenia propanu w kanale poziomym.



Rys.1. Współczynnik wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych dla $d=3\text{mm}$, $G=130\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$, $q=15\text{kW}/\text{m}^2$, $t=10^\circ\text{C}$.

Badania wrzenia propanu w kanałach poziomych prowadzone były dla różnych warunków cieplno-przepływowych tj. dla różnych wartości gęstości strumienia ciepła, gęstości strumienia masy, średnicy i temperatury nasycenia. Zestawienie warunków dla jakich przeprowadzane były badania, które ujęto w bazie danych, przedstawiono w tabeli (tab.1)

Tab. 1. Warunki badań eksperymentalnych

Autor	Średnica d, mm	Gęstość masy strumienia G, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$	Gęstość ciepła strumienia q, kW/m^2	Temperatura nasycenia t, $^\circ\text{C}$
Pamitran [1]	3	50	5	10
Pamitran [1]	3	100	5	10
Pamitran [1]	3	150	5	10
Pamitran [1]	3	150	15	0
Pamitran [1]	1,5	200	15	10
Pamitran [1]	3	200	15	10
Pamitran [1]	3	200	30	10
Pamitran [2]	3	100	15	10
Pamitran [2]	3	130	15	10
Pamitran [2]	3	150	10	0
Choi [3]	3	100	15	10
Choi [3]	3	130	15	10
Choi [3]	3	150	15	10
Choi [3]	3	150	10	0
Choi [3]	3	150	15	0
Choi [3]	3	150	20	0
Choi [3]	3	150	15	5
Shin [4]	7,7	424	30	12
Shin [4]	7,7	583	30	12
Thome [5]	2,46	424	30	12
Thome [5]	2,46	583	30	12

2. METODY OBLICZENIOWE

Do często cytowanych w literaturze metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia w przepływie zaliczyć można metody Kutateladze, Liu i Winterton'a, Mumm'a, Guerrieriego i Talty cytowane m.in. przez Witczaka [6] oraz metodę Kenning'a i Cooper'a cytowaną przez Dutkowskiego [7].

Metoda Kutateladze opiera się na modelu asymptotycznym:

$$\alpha_{2F} = \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_{wo}}{\alpha_{co}}\right)^2} \cdot \alpha_{co} \quad (1)$$

gdzie,

$$\alpha_{wo} = 55 P_{zr}^{0,12} (-\log P_{zr})^{-0,55} M^{-0,5} q^{0,67} \quad (2)$$

$$\alpha_{co} = 0,023 \frac{\lambda_c}{D} Re_{co}^{0,8} Pr_c^{0,4} \quad (3)$$

$$Re_{co} = GD/\eta_c \quad (4)$$

Metoda Liu i Winterton'a opisywana jest zależnością:

$$\alpha_{2F} = \sqrt{(E\alpha_{co})^2 + (S\alpha_{wo})^2} \quad (5)$$

gdzie α_{wo} obliczane jest z (2), α_{co} z (3), wartości E i S natomiast wylicza się z:

$$E = \left[1 + x Pr_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_g} - 1\right)\right]^{0,35} \quad (6)$$

$$S = \frac{1}{1 + 0,05E^{0,1} Re_{co}^{0,16}} \quad (7)$$

Metoda Mumm'a jest metodą opracowaną dla odparowywania konwekcyjnego podczas przepływu w kanałach poziomych, a jej równanie przyjmuje postać:

$$\alpha_{2F,K(P)} = \left[4,3 + 5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\rho_c}{\rho_g} - 1\right)^{1,64} x\right] Re_{co}^{0,808} Bo^{0,64} \alpha_{ck} \quad (8)$$

gdzie Re_{co} oblicza się z (4), liczbę wrzenia natomiast z:

$$Bo = \frac{q}{Gr} \quad (9)$$

Metoda Guerrieriego i Talty, podobnie jak metoda Mumm'a opracowana jest dla zakresu odparowania konwekcyjnego, w którym:

$$\alpha_{2F,K} = F \alpha_{ck} \quad (10)$$

$$F = 3,4 \left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^{0,45} \quad (11)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c}\right)^{0,5} \left(\frac{\eta_c}{\eta_g}\right)^{0,1} \quad (12)$$

$$\alpha_{ck} = \alpha_c = 0,023 \frac{\lambda_c}{D} Re_c^{0,8} Pr_c^{0,4} \quad (13)$$

$$Re_c = \frac{G(1-x)D}{\eta_c} \quad (14)$$

Metoda Kenning'a i Cooper'a przyjmuje postać:

$$\alpha_{2F,K} = E \alpha_{ck} \quad (15)$$

gdzie α_{ck} oblicza się z równania (12), parametr E natomiast z:

$$E = 1 + 1,8 \left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^{0,87} \quad (16)$$

Parametr Lockharta-Martinelli'ego X_{tt} oblicza się z (12).

3. ANALIZA METOD OBLICZENIOWYCH

Na podstawie przedstawionych warunków cieplno-przepływowych występujących podczas badań eksperymentalnych obliczono wartości współczynnika wnikania ciepła przy wykorzystaniu zaproponowanych do analizy metod obliczeniowych. Następnie dokonano porównania obliczonych i zmierzonych wartości współczynnika wnikania ciepła w celu oceny możliwości wykorzystania metod obliczeniowych do wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych.

Przedstawione na rys.2 porównanie zmierzonych i obliczonych wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych pokazuje, że dla większości analizowanych metod (poza metodą Mumm'a) większość punktów mieści się w zakresie $\pm 50\%$. Dla metody Kutateladze część punktów wykracza poza zakres zarówno powyżej $+50\%$ i poniżej -50% . Dla metod Kenning'a i Cooper'a, Liu i Winterton'a oraz Guerrieriego i Talty część punktów pomiarowych wykracza poza granicę $+50\%$, co oznacza, że metody obliczeniowe zawyżają wartości współczynnika wnikania ciepła w porównaniu z wartościami zmierzonymi.

Dla analizowanych metod sprawdzono także wpływ stopnia suchości na poprawność stosowanych metod obliczeniowych. W tym celu określono stosunek wartości zmierzonego współczynnika wnikania ciepła do wartości współczynnika wnikania ciepła obliczonego poszczególnymi metodami. Wartość tego stosunku w zależności od wartości stopnia suchości przedstawiono dla poszczególnych metod obliczeniowych przedstawiono na rys.3.

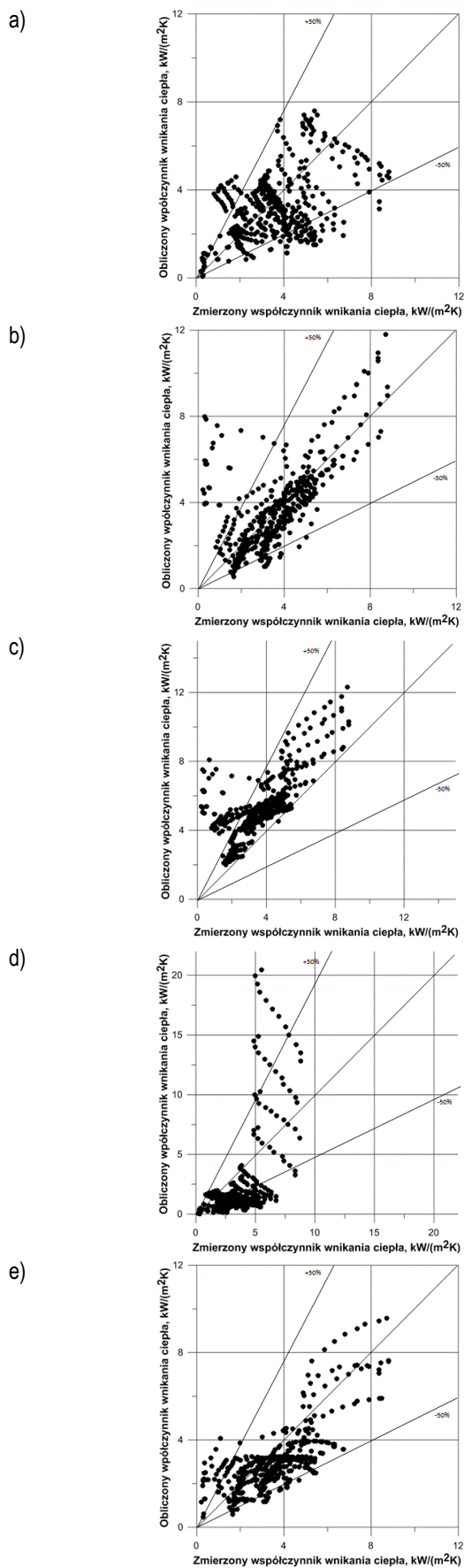
Dokonana w ten sposób ocena analizowanych metod wykazuje jednoznacznie, że żadna z nich nie opisuje dobrze wartości współczynnika wnikania ciepła dla wysokich wartości stopnia suchości x (powyżej 0,8), czyli dla zakresu wysychania ścianki kanału. Dla metod Kenning'a i Cooper'a oraz Guerrieriego i Talty stosunek wartości zmierzonych do obliczonych jest znacznie wyższy od jedności przy niskich stopniach suchości, co oznacza, że metody te nie mogą być stosowane dla tych zakresów. Dla metody Kutateladze oraz Mumm'a stosunek ten bardzo odbiega od jedności dla wyższych wartości stopnia suchości, co oznacza, że metody te zaniżają w tym obszarze wartości współczynnika wnikania ciepła w porównaniu z wartościami zmierzonymi, a co za tym idzie nie mogą być stosowane w zakresie wyższych wartości stopnia suchości. Dla zakresu wrzenia przed wysychaniem ścianki najlepiej sprawdza się metoda Liu i Winterton'a dla której wartość stosunku większości punktów doświadczalnych utrzymują się na stałym poziomie, nieco niższym od jedności.

Dla obliczonych wartości wykonano również analizę statystyczną, w której obliczano średnią wartość błędu względnego oraz średnie odchylenie standardowe z przedstawionych zależności:

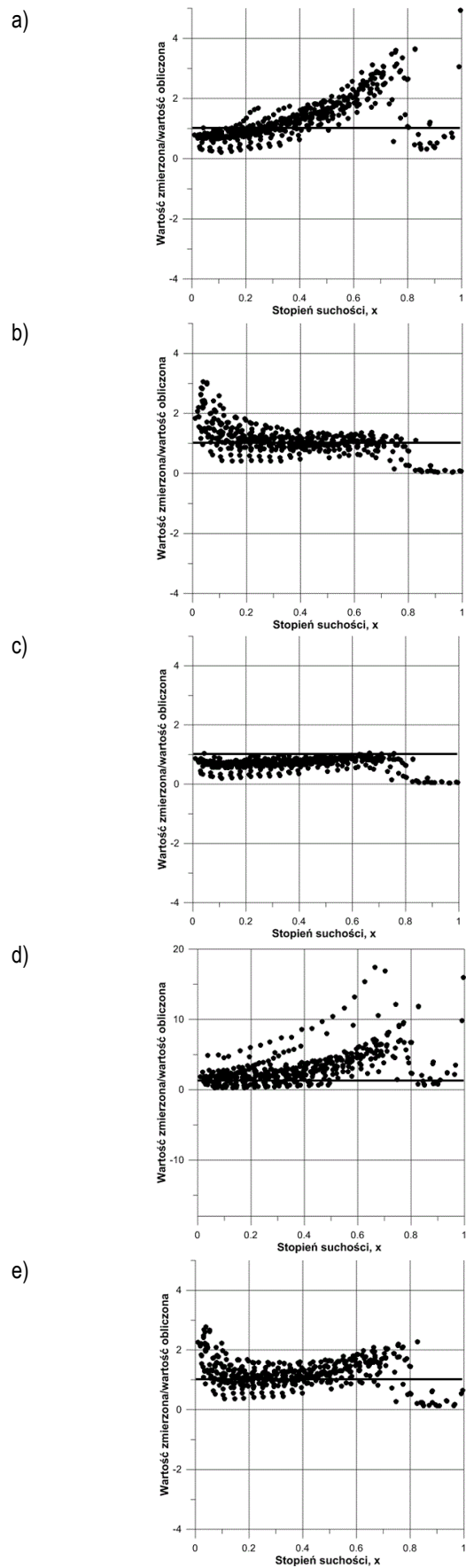
$$\overline{\delta\alpha_{2F}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\alpha_{2F,i} \quad (17)$$

$$\delta(\delta\alpha_{2F}) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta\alpha_{2F,i} - \overline{\delta\alpha_{2F}})^2 \right]^{0,5} \quad (18)$$

Obliczone wartości średniego błędu względnego oraz średniego odchylenia standardowego dla analizowanych metod zestawiono w tabeli (tab. 2).



Rys.2. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości współczynnika wnikańia ciepła podczas wrzenia propanu dla metody a) Kutateladze, b) Kenning'a i Cooper'a, c) Liu i Winterton'a, d) Mumm'a, e) Guerriero i Talty.



Rys.3. Stosunek wartości zmierzonych do wartości obliczonych współczynnika wnikańia ciepła w zależności od stopnia suchości dla metod a) Kutateladze, b) Kenning'a i Cooper'a, c) Liu i Winterton'a, d) Mumm'a, e) Guerriero i Talty.

Tab. 2. Wyniki analizy statystycznej dla analizowanych metod

Metoda	$\overline{\delta\alpha_{2F}}$	$\delta(\delta\alpha_{2F})$
Kutateladze	0,03	0,62
Kenning i Cooper	0,46	2,70
Liu i Wintertone	1,02	2,88
Mumm	0,44	1,04
Guerriri i Talty	0,02	0,91

Wysokie wartości błędu względnego oraz średniego odchylenia standardowego mogą być związane z faktem uwzględnienia punktów dla zakresu stopnia suchości po wyschnięciu ścianki kanału. Z tego względu dokonano analizy statystycznej dla poszczególnych metod bez uwzględnienia wartości współczynnika wnikania ciepła po wyschnięciu ścianki. Tak obliczone wartości średniego błędu względnego oraz średniego odchylenia standardowego zamieszczono w tabeli (tab. 3).

Tab. 3. Wyniki analizy statystycznej dla analizowanych metod bez uwzględniania wartości po wysychaniu ścianki

Metoda	$\overline{\delta\alpha_{2F}}$	$\delta(\delta\alpha_{2F})$
Kutateladze	0,01	0,59
Kenning i Cooper	0,03	0,43
Liu i Wintertone	0,49	0,58
Mumm	0,44	1,05
Guerriri i Talty	0,13	0,44

Analiza statystyczna przeprowadzona dla metod obliczeniowych bez uwzględniania punktów po wyschnięciu ścianki kanału wskazuje, że wartości tych wielkości znacznie się obniżyły. Najniższe wartości błędu względnego oraz średniego odchylenia standardowego uzyskano w tym zakresie dla metody Guerriri'ego i Talty oraz Kenning'a i Cooper'a. Zadawalające wartości uzyskały również metody Kutateladze oraz Liu i Wintertone'a. Dla metody Mumm'a uzyskano w dalszym ciągu wysoką wartość średniego odchylenia standardowego, co oznacza, że metoda ta źle opisuje wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych.

4. NOWA METODA OBLICZENIOWA

Na podstawie przeprowadzonej analizy opracowano również nową własną metodę obliczeniową wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych. Metoda została opracowana na bazie metody Liu i Wintertona, w której dokonano zmian równań korelacyjnych opisujących parametry E oraz S:

$$\alpha_{2F} = \left(\sqrt{(E\alpha_{co})^2 + (S\alpha_{wo})^2} \right) \quad (19)$$

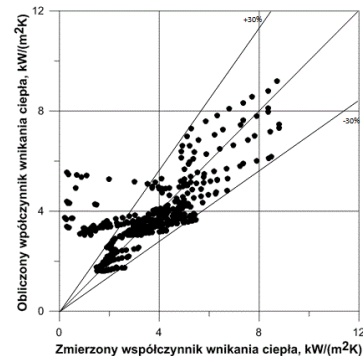
$$E = \left[1 + 0,5xPr_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_g} - 1 \right) \right]^{0,35} \quad (20)$$

$$S = \frac{1}{1 + 0,09E^{0,9}Re_{co}^{0,16}} \quad (21)$$

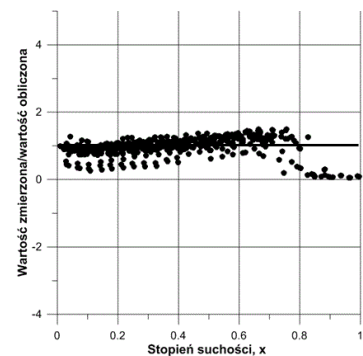
Podobnie jak dla analizowanych wyżej metod dokonano porównania obliczonych i zmierzonych wartości współczynnika wnikania ciepła dla wrzenia propanu (rys.4) oraz sprawdzono wpływ stopnia suchości na stosunek obliczonych i zmierzonych wartości współczynnika wnikania ciepła (rys.5). Dokonano również analizy statystycznej dla zaproponowanej metody (tab.4).

Na podstawie porównania zmierzonych i obliczonych wartości współczynnika wnikania ciepła dla wrzenia propanu w kanałach poziomych można zauważyć, że większość punktów pomiarowych mieści się w zakresie $\pm 30\%$.

Na podstawie rysunku (rys.5) można zauważyć także, że dla zaproponowanej metody obliczeniowej większość punktów stosunku wartości zmierzonej do obliczonej w zakresie stopnia suchości przed wysychaniem ścianki jest zbliżona do jedności. Oznacza to, że metoda dobrze opisuje wartości współczynnika wnikania ciepła dla wrzenia propanu w kanałach poziomych.



Rys.4. Porównanie zmierzonych i obliczonych nową metodą obliczeniową wartości współczynnika wnikania ciepła dla wrzenia propanu w kanałach poziomych.



Rys.5. Stosunek wartości zmierzonych do wartości obliczonych współczynnika wnikania ciepła w zależności od stopnia suchości dla nowej metody obliczeniowej.

Przeprowadzona analiza statystyczna wskazuje, że wartości średniego błędu względnego oraz średniego odchylenia standardowego są zadawalające, co oznacza, że zaproponowana metoda dobrze opisuje wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w kanałach poziomych.

Tab. 4. Wyniki analizy statystycznej dla własnej metody bez uwzględniania wartości po wysychaniu ścianki

Metoda	$\overline{\delta\alpha_{2F}}$	$\delta(\delta\alpha_{2F})$
Nowa metoda	0,09	0,43

PODSUMOWANIE

Spśród analizowanych metod obliczeniowych wyznaczania wartości współczynnika wnikania ciepła, najlepiej opisującą wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu okazała się metoda Liu i Winterton'a, w której stosunek wartości współczynnika wnikania ciepła zmierzonych do obliczonych był najbliższy jedności. Pozostałe analizowane metody obliczeniowe wykazywały mniejsze dokładności obliczeniowe, a tym samym okazały się mało

przydatne do wyznaczania wartości współczynników wnikania ciepła w warunkach wrzenia propanu w kanałach poziomych.

Uwzględniając możliwość poprawy dokładności metody Liu i Winterton'a, dokonano jej modyfikacji uzyskując nową metodę obliczeniową zapewniającą dokładniejsze wyniki obliczeń wartości współczynnika wnikania ciepła podczas wrzenia propanu w analizowanym zakresie zmian parametrów cieplno-przepływowych. Poszerzenie bazy danych eksperymentalnych pozwoli w przyszłości na uzyskanie nowej zależności słusznej dla szerszego zakresu badań wrzenia tego czynnika.

BIBLIOGRAFIA

1. Pamitran A.S. i in., *Evaporation heat transfer coefficient in single circular small tubes for flow natural refrigerants of C₃H₈, NH₃ and CO₂*, International Journal of Multiphase Flow 2011, nr 37, s.794-801
2. Pamitran A.S. i in., *Two-phase flow heat transfer of propane vaporization in horizontal minichannels*, Journal of Mechanical Science and Technology 2009, nr 23, s.599-606
3. Choi K.I. i in., *Pressure drop and heat transfer during two-phase flow vaporization of propane in horizontal smooth minichannels*, International Journal of Refrigeration 2009, nr 32, s.837-845
4. Shin J.Y. i in., *Experimental study on forced convective boiling heat transfer of pure refrigerants and refrigerant mixtures in a horizontal pipes*, International Journal of Refrigeration 1997; nr 20, s.267-275
5. Thome J.R. i in., *Flow boiling of ammonia and hydrocarbons: A state-of-the-art review 2008*, nr 32, s.603-620
6. Witczak S., *Wrzenie naturalnych czynników chłodniczych podczas przepływu w kanałach i minikanalach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013
7. Dutkowski K., *Wymiana ciepła i opory przepływu czynników jedno- i dwufazowych w minikanalach*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011

ASSESSMENT OF POSSIBILITY OF USING EXISTING CALCULATION METHODS TO PREDICT HEAT TRANSFER COEFFICIENT DURING PROPANE BOILING IN HORIZONTAL CHANNELS

Abstract

Paper discuss the assessment of possibility of using existing calculation methods, which has been developed for synthetic refrigerants, to predict heat transfer coefficient of propane boiling in horizontal channels. The analysis was made for selected calculation methods compared with experimental results taken from literature in various thermal-flow conditions for boiling propane.

Autorzy:

mgr inż. **Joanna Sroka** – Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Procesowej

prof. dr hab. inż. **Stanisław Witczak** – Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Procesowej



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego