

TADEUSZ ORZECZOWSKI
ANNA ZWIERZCHOWSKA
SYLWIA ZWIERZCHOWSKA

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce

Wymiana ciepła na żebrach z metalowo włóknistym pokryciem kapilarno-porowatym

Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na wielkość wymiany ciepła w urządzeniach wymiennikowych pracujących przy zmianie fazy czynnika jest dobór rodzaju i parametrów pokrycia ze względu na możliwie dużą gęstość strumienia ciepła przy możliwie niskiej różnicy temperatur. W literaturze jest wiele badań, które dotyczą pokryć wytwarzanych różnymi technologiami. Przedmiotem dociekań jest przede wszystkim grubość i porowatość pokrycia.

Jednymi z najlepszych pokryć są metaliczno-włókniste warstwy kapilarno-porowate, które wytwarza się z cienkich włókien metalowych o średnicy rzędu 10^{-4} – 10^{-5} m, z których formuje się warstwę spiekaną i napiękaną na powierzchnie wymieniające ciepło. Obszerne badania nad takimi powłokami prowadzono w krajach byłego Związku Radzieckiego dla celów techniki kosmicznej i militarnej. Ich przegląd można znaleźć w pracy [1]. Struktury kapilarno-porowate wykonane były z metali znacznie różniących się przewodnością cieplną, takich jak miedź, nikiel i stale nierdzewne. Pomiary prowadzono dla różnych cieczy wrzących, takich jak woda, etanol, freon-22 i freon-113. Zmiennym parametrem była grubość i porowatość warstwy, których wpływ na proces wymiany ciepła badano przy wrzeniu w dużej objętości i przy kapilarnym zasilaniu struktury porowatej. Z uzyskanych wyników wysunięto wniosek, iż przy małych gęstościach strumienia transport ciepła poprzez wypełnioną cieczą strukturę kapilarno-porowatą zachodzi na drodze przewodzenia, z odparowaniem cieczy na zewnętrznej powierzchni struktury. Natomiast współczynnik przejmowania ciepła był o rząd większy od odpowiadającego mu współczynnika w obszarze konwekcji swobodnej dla powierzchni gładkiej. Poza tym wykazano, że gęstość strumienia ciepła i przegrzanie powierzchni grzejnej, dla których dochodzi do przejścia z obszaru parowania do wrzenia pęcherzykowego, zależą od charakterystyk struktury kapilarno-porowatej oraz właściwości cieplnych wrzącej cieczy. Analizując proces wrzenia *Semena* ze współpracownikami [1] doszedł do wniosku, iż pęcherze pary rozwijają się w niej przy stałej obecności przegrzanej mikrowarstwy cieczy, co przyspiesza wzrost pęcherzy.

Wrzenie na powierzchniach z pokryciem metalowo-włóknistym przebiega inaczej niż na powierzchniach gładkich. Tłumaczy się to specyficznymi warunkami wymiany ciepła w warstwie pokrywającej powierzchnię grzejną. Według pracy [2] wrzenie pęcherzykowe na powierzchni gładkiej związane jest z centrami nukleacji, którymi są zagłębienia lub rysy, otoczone przegrzaną warstwą cieczy o grubości równej około średnicy odrywającego się pęcherza. Wymiana ciepła odbywa się przez konwekcję i parowanie. Natomiast

w przypadku warstwy porowatej wrzenie odbywa się wewnątrz struktury, a ciepło przewodzone jest od powierzchni grzejnej do cząstek mikrostruktury.

W Polsce badania nad takimi strukturami podjął zespół pod kierunkiem prof. *M.E. Poniewskiego* [3]. Pewną niedogodnością w pełnym wykorzystaniu tych badań jest to, że dotyczą powierzchni izotermicznych i poziomych. Rzeczywiste układy wymiennikowe są nie tylko nieizotermiczne, ale też są konstruowane w różnej orientacji przestrzennej. Np. wg pracy [4] zmiana nachylenia powierzchni z poziomego do pionowego skutkuje nawet ponad 100% zmianą przy umiarkowanych gęstościach strumienia ciepła. Stwierdza się tam również, że wpływ nachylenia maleje dla większych q .

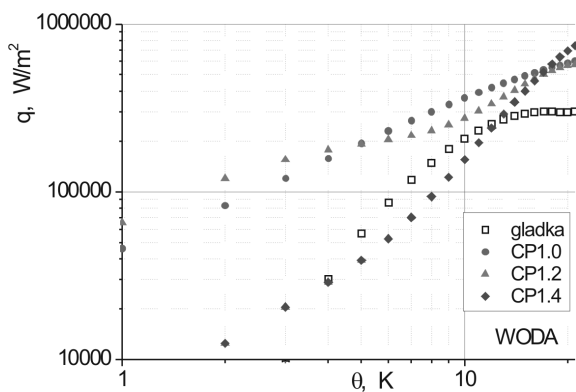
Cel i metodyka badań

Celem badań było wyznaczenie krzywych wrzenia dla nieizotermicznej powierzchni żebra z pokryciem kapilarno-porowatym o różnej wysokości, pracującego przy wrzeniu wody pod ciśnieniem atmosferycznym.

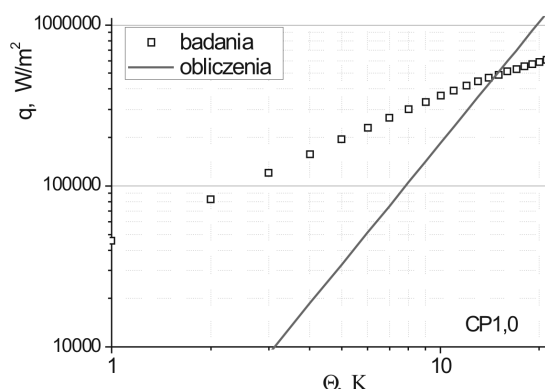
Badania wykonano na stanowisku, którego głównym elementem jest płaskie żebro o przekroju prostokątnym. Na jedną z jego powierzchni, od strony wrzącej cieczy, nałożono warstwę intensyfikującą wymianę ciepła. Ciepło doprowadzane było do podstawy żebra za pomocą grzejnika głównego zasilanego z autotransformatora. Wspomagający układ grzewczy zapewniający wrzenie w całej objętości wykonano z drutu i spiralnie ułożono na dnie naczynia. Dla wszystkich pomiarów dostarczana moc do układu pomocniczego była taka sama. Chłodzenie par i odzysk kondensatu realizowany był w układzie dwóch chłodziw.

Zewnętrzna gładka powierzchnia żebra obserwowano była kamerą termowizyjną *VarioCAM[®]hr* produkcji firmy *Jenoptik*. Jest ona wyposażona w niechłodzoną macierz bolometryczną o formacie obrazu 640×480 pikseli. Urządzenie przeznaczone jest do pracy w długofalowym zakresie promieniowania podczerwonego 7,5–14 μm . Badania prowadzono ze standardowym obiektywem kamer (30×23)°. Wynikiem pomiaru jest pole temperatury. Dokładny opis stanowiska i metodykę prowadzenia pomiaru podano w pracy [5].

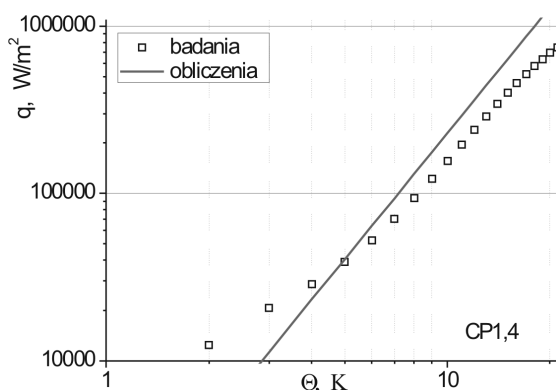
Badania wykonano dla próbek miedzianych o następujących grubościach warstw 1,0, 1,2 oraz 1,4 mm i porowatości w granicach około 80–85%. Cieczą wrzącą była woda destylowana. Warstwę kapilarno-porowatą wykonano z pociętego drutu o średnicy 0,05 mm i długości włókien 3 mm, które napięzono w redukcyjnej atmosferze wodoru.



Rys. 1. Krzywe wrzenia dla wody pod ciśnieniem atmosferycznym



Rys. 2. Porównanie doświadczalnej krzywej wrzenia dla żebra z obliczeniami wg [6] dla $h = 1,0$ mm



Rys. 3. Porównanie doświadczalnej krzywej wrzenia dla żebra z obliczeniami wg [6] dla $h = 1,4$ mm

Wyniki badań

Dla każdej z próbek zmierzono powierzchniowy rozkład temperatury. Na tej podstawie wyznaczono krzywe wrzenia, które pokazano na rys. 1. Wyniki odniesiono do miedzianej powierzchni technicznie gładkiej i pracującej w tych samych warunkach.

Jak wynika z badań *Nishikawy* [4] wielkość odprowadzane-go strumienia ciepła przy wrzeniu zależy od przestrzennego usytuowania powierzchni.

Celem określenia ewentualnego wpływu nachylenia próbek wyniki własne odniesiono do badań w [6], gdzie podano następującą zależność korelacyjną:

$$\alpha = kq^{0,6}\delta^m\lambda_f^{0,07}(r\rho_v)^{0,3}\left(\frac{\lambda_{li}^2}{v_{li}\sigma T_{sat}}\right)^{0,2} \quad (1)$$

gdzie:

- δ – wysokość warstwy kapilarno-porowatej,
 - λ_f – efektywny współczynnik przewodzenia,
 - r – ciepło parowania cieczy,
 - ρ_v – gęstość pary cieczy,
 - λ_{li} – współczynnik przewodzenia cieczy,
 - v_{li} – współczynnik lepkości kinematycznej cieczy,
 - σ – napięcie powierzchniowe cieczy,
 - T_{sat} – temperatura wrzenia cieczy.
- współczynnik k dobiera się dla każdej z warstw ze względu na jej wysokość i na rodzaj materiału.
- Powyższa zależność dotyczy metalowo włóknistych struktur kapilarno-porowatych o różnej wysokości warstw.

Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że dla warstw stosunkowo cienkich otrzymuje się znaczne różnice w wielkości odprowadzanych strumieni ciepła przy umiarkowanym przegrzaniu, które wraz ze wzrostem wysokości warstwy stają się coraz mniejsze.

LITERATURA

1. *M.G. Semena, A.N. Geršuni, V.K. Zaripov*: Teplovyte trubyy s metallovolknistymi kapilarnymi strukturami. Višč. Škola, Kiev, 1984.
2. *P.S. O'Neill, C.F. Gottmann, J.W. Terbot*: Heat Exchangers for NGL, Chem. Eng. Prog., 67 (1971).
3. *M.E. Poniewski*: Wrzenie pęcherzykowe na rozwiniętych mikropowierzchniach. Monografie, Studia, Rozprawy, 23 Kielce (2001).
4. *K. Nishikawa, Y. Fujita*: Nucleate Boiling Heat Transfer and Its Augmentation. Hartnett J.P., Irvine, Jr., T.F.(ed.), Academic Press, Advances in Heat Transfer, 20, 1 (1990).
5. *T. Orzechowski*: Experimental Thermal and Fluid Science. 31 Issue 8 (2007).
6. *M.G. Semena, V.K. Zaripov, A. A. Shapoval*: Inz.-Fizicheskii Zhurnal, 52, 4, (1987).

Udział w konferencji był współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego jako projekt pt. „Program Rozwojowy Potencjału Dydaktycznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach – kształcenie na miarę sukcesu” Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Umowa nr UDA-POKL.04.01.01-00-175/08-00.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2007 jako projekt badawczy.