

# KRYTYCZNY STRUMIEŃ CIEPŁA PODCZAS WRZENIA W PRZEPŁYWIE W KANAŁACH

dr hab. inż. Dariusz MIKIELEWICZ, prof. nadzw. PG

mgr inż. Michał GLIŃSKI

mgr inż. Jan WAJS

Katedra Techniki Ciepłej  
POLITECHNIKA GDAŃSKA

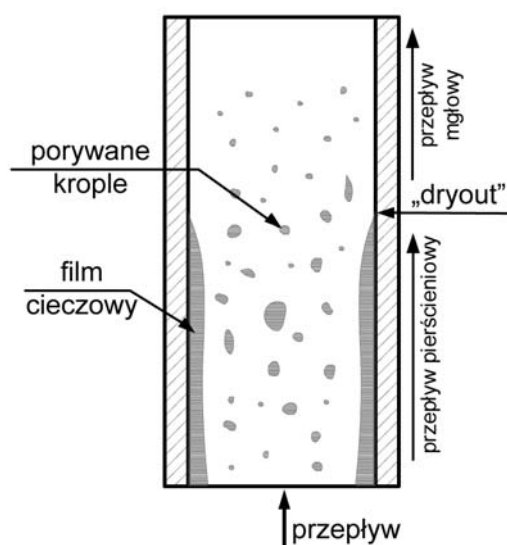
## 1. WPROWADZENIE

Wrzenie w przepływie jest jednym z najbardziej skutecznych sposobów odbioru ciepła, a jednocześnie najbardziej skomplikowanym mechanizmem konwekcyjnej wymiany ciepła jaki możemy spotkać w zastosowaniach praktycznych. Bardzo duża intensyfikacja przekazywania ciepła podczas tego procesu stwarza możliwość redukcji wymiarów wymienników ciepła. Jest to bardzo istotne w dobie miniaturyzacji maszyn i urządzeń. Z procesem wrzenia w przepływie wiążą się kryzysowe warunki przejmowania ciepła, czyli warunki, gdzie zachodzi nagła zmiana współczynnika przejmowania ciepła oraz temperatury ścianki. Wyróżnia się: zerowy kryzys wrzenia, tj. przejście mechanizmu jednofazowej wymiany ciepła w cieczy w dwufazowe wrzenie pęcherzykowe, pierwszy kryzys I rodzaju (rys. 1) – przejście dwufazowego wrzenia pęcherzykowego cieczy w dwufazowy przepływ z błoną parową przy ściance (z reguły ma to miejsce przy małych stopniach suchości i dużych strumieniach ciepła), pierwszy kryzys II rodzaju (rys. 2) – przejście struktury pierścieniowej cieczy w mgłową przy równoczesnym wysychaniu filmu cieczowego na ścianie (zachodzi przy dużych stopniach suchości i małych lub średnich strumieniach ciepła). Po kryzysie drugiego rodzaju występuje tzw. pokryzysowa wymiana ciepła charakteryzująca się odparowaniem i separacją kroplel. Przy krytycznym strumieniu ciepła następuje zmiana mechanizmu wymiany ciepła. W niniejszym artykule autorzy chcieliby przybliżyć czytelnikowi zagadnienia związane z kryzysami wrzenia, przy czym szczególna uwaga zostanie poświęcona zjawisku pierwszego kryzysu wrzenia II rodzaju związanego ze zjawiskiem wysychaniu filmu cieczowego na ścianie.

W początkowym okresie badań mechanizmów związanych ze strumieniami krytycznymi, wykorzystywano wodę jako czynnik roboczy. Miała ona szerokie zastosowanie w wielu urządzeniach energetycznych, takich jak: reaktory jądrowe czy generatory pary. W tych urządzeniach kryzys wrzenia jest zjawiskiem bardzo niepożądanym. W wysokich temperaturach może dojść do przepalenia ścianki kanałów i awarii całego urządzenia, może to prowadzić do



Rys. 1. Odwrócony przepływ pierścieniowy – kryzys wrzenia I rodzaju



Rys. 2. Przepływ pierścieniowy z wysychaniem filmu na ścianie „dryout” – kryzys wrzenia II rodzaju

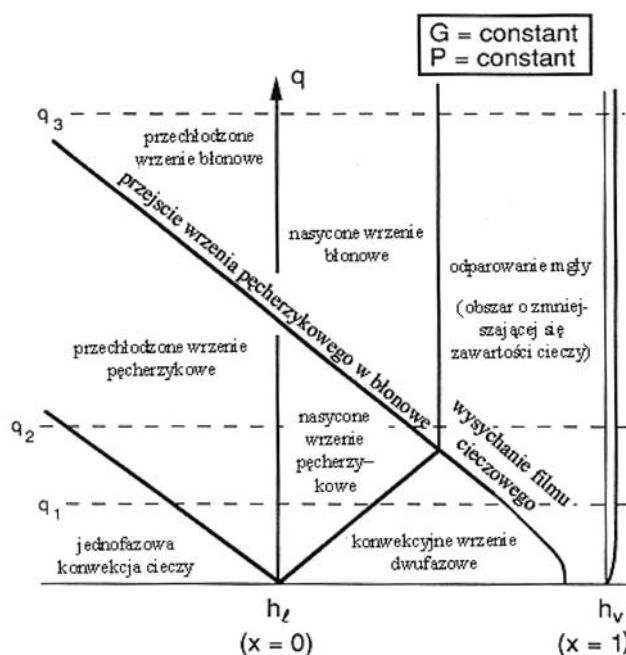
katastrofalnych następstw. Ze względu na budowę tych urządzeń, badania prowadzono na rurach pionowych o różnych średnicach, w których przepływ wody odbywał się od dołu do góry. W wyniku tych eksperymentów opracowano wiele korelacji opisujących krytyczny strumień ciepła pierwszego i drugiego rodzaju. Szacuje się, że w tematyce tego zagadnienia zebrano około 30000 punktów eksperymentalnych [1], dla szerokiego zakresu zmienności parametrów.

Innym typem urządzeń, w których krytyczny strumień ciepła posiada bardzo istotne znaczenie, są parowniki wykorzystywane w technice chłodniczej i klimatyzacyjnej. W urządzeniach tych dążymy do osiągnięcia pełnego odparowania cieczy z przepływu lub nawet przegrzania pary. Jak wiadomo jest to zjawisko konieczne, a zarazem korzystne, ponieważ dzięki niemu zapobiegamy zalewaniu sprężarek ciekłym czynnikiem chłodniczym. Energetyka również zainteresowana jest precyzyjnym wyznaczeniem lokalizacji kryzysu, czyli miejsca wysychania filmu cieczowego w wytwornicach pary. W tych urządzeniach zachodzi kryzys II rodzaju, związany z wysychaniem filmu na ścianie kanału i przejścia przepływu w przepływ mgłowy charakteryzujący obszar pokryzysowej wymiany ciepła. Badania kryzysów wrzenia II rodzaju z wykorzystaniem czynników chłodniczych prowadzono na rurach pionowych, ale także w rurach poziomych. Poziomy układ rur znajduje zastosowanie w wymiennikach ciepła urządzeń chłodniczych.

Precyzyjne wyznaczenie krytycznego strumienia ciepła II rodzaju jest nadal aktualne, gdyż stan wiedzy o warunkach jego występowania jest nadal niewystarczający. Najnowsze badania ukierunkowane są na dogłębne zrozumienie fizyki zjawisk prowadzących do powstawania kryzysów wrzenia [2]. Rozwój technik intensyfikacji wymiany ciepła otworzył kompletnie nowe obszary, gdzie dane eksperymentalne związane z kryzysami wrzenia są bardzo pożądane. Dla przykładu coraz częściej w praktyce wykorzystuje się nowe rozwiązania kompaktowych wymienników ciepła, w których parametry występowania wysychania filmu cieczowego na ścianie są nadal nieokreślone. Tego typu brak wiedzy występuje również w badaniach podstawowych. Odczuwa się brak precyzyjnie zdefiniowanych kryteriów występowania krytycznego strumienia ciepła w kanałach o małych średnicach, zarówno gładkich, jak i ożebrowanych.

## 2. STRUKTURY WRZENIA W PRZEPŁYWIE I MIEJSCA WYSTĄPIENIA KRYZYSÓW WRZENIA

Struktury przepływu wrzącego czynnika w rurach pionowych i poziomych dokładnie przedstawiono i omówiono na łamach TChIK w numerze 10/2001, gdzie podano również oryginalną metodę wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła [3]. Metoda zmodyfikowana, mająca zastosowanie do kanałów o małych średnicach, została opisana w [4]. W niniejszej publikacji autorzy przedstawiają struktury wrzenia prowadzące do powstawania kryzysów wrzenia i

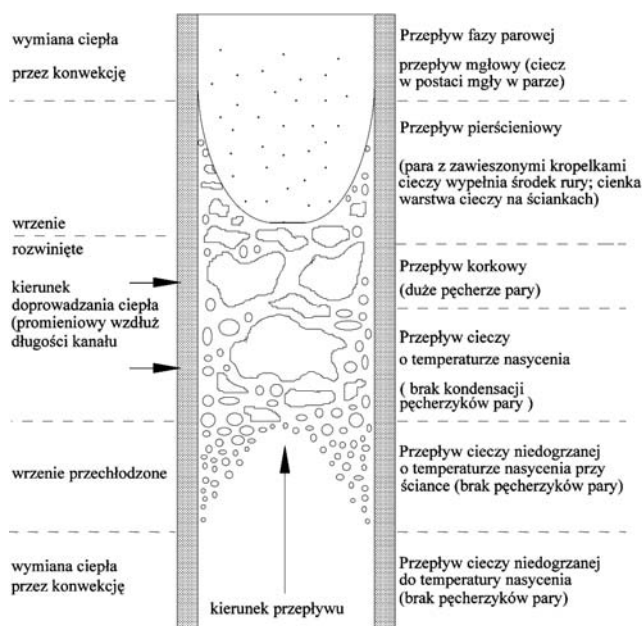


Rys. 3. Struktury wrzenia w przypadku stałej gęstości strumienia ciepła

miejsca wystąpienia tych kryzysów. Analiza zostanie przeprowadzona na podstawie mapy przepływu przedstawionej na rysunku 3, na którym lokalizacja krytycznego strumienia ciepła zaznaczona jest linią pochyłą. Natura przejścia między poszczególnymi strukturami wyznaczonymi przez poszczególne linie zmienia się wraz z entalpią przepływu. Dla warunków przechłodzenia oraz małych stopni suchości  $x$  przejście przez punkt krytyczny odpowiada zmianie mechanizmu wrzenia z pęcherzykowego na błonowe. Z tego też powodu punkt takiego przejścia określa się czasami jako odejście od wrzenia pęcherzykowego (ang. departure from nucleate boiling – DNB) – pierwszy kryzys I rodzaju. W przypadku średnich lub dużych wartości stopnia suchości mamy do czynienia przede wszystkim ze strukturą pierścieniową przepływu, a zmiana mechanizmu wymiany ciepła polega głównie na wysychaniu filmu cieczowego na ścianie kanału. Dla takiego zakresu warunków wymiany ciepła mówimy o wysychaniu filmu (ang. dryout) – pierwszy kryzys II rodzaju. Należy przy tym podkreślić, że spadek współczynnika przejmowania ciepła podczas wyschnięcia filmu na ścianie (kryzys II rodzaju) nie jest aż tak gwałtowny jak ten, z którym mamy do czynienia podczas zmiany mechanizmu wymiany ciepła z wrzenia pęcherzykowego na wrzenie błonowe (I rodzaju), przy takim samym masowym natężeniu przepływu, niemniej są to zmiany znaczące.

Pozioma linia stałej gęstości strumienia ciepła  $q_1$  na rys. 3 odpowiadająca przypadkowi przyłożenia małego strumienia ciepła wyznacza ciąg struktur wrzenia, którym poddany jest przepływ dwufazowy. Tradycyjny sposób przejścia z jednej struktury w drugą, dla tego przypadku, pokazano na rys. 4.

W warunkach, gdy zastosujemy większy strumień ciepła, możemy mieć do czynienia z całkowicie innym obra-



Rys. 4. Struktury przepływu w przepływie dwufazowym nieadiabaticznym – kryzys II rodzaju

zem struktur. Przypadek taki jest ilustrowany linią stałej gęstości strumienia ciepła  $q_2$  (rys. 3). Wówczas początek wrzenia może mieć miejsce w strefie przechłodzenia cieczy. Wrzenie przechłodzone przechodzi we wrzenie nasycone, gdy entalpia rdzenia osiąga entalpię nasycenia. Wraz ze wzrostem stopnia suchości w pewnym miejscu osiągnany jest punkt, w którym występuje kryzys wrzenia pierwszego rodzaju. Po przejściu tego miejsca wytwarza się w przepływie cienka warstwa pary na ścianie o temperaturze nasycenia i wówczas mamy do czynienia z tzw. wrzeniem błonowym. W rozpatrywanym przypadku stałej gęstości strumienia ciepła na ścianie, w takim miejscu zwykle występuje znaczny wzrost jej temperatury. Jeżeli proces odparowania jest kontynuowany w zakresie wrzenia błonowego, zawartość cieczy w rdzeniu przepływu staje się w końcu tak mała, że tworzą się krople i przepływ przechodzi w strukturę mgłową (o małej zawartości fazy ciekłej). Następnie, podobnie jak w przypadku małych gęstości strumienia ciepła, gdy proces odparowania kropek jest zakończony, wymiana ciepła odbywa się na drodze konwekcji jednofazowej w parze.

W przypadku bardzo dużych strumieni ciepła rozpatrzmy struktury oznaczone linią stałej gęstości strumienia ciepła  $q_3$ . Na wlocie do kanału mamy od razu do czynienia z przechłodzonym wrzeniem błonowym. Wraz z rozwojem przepływu struktura przechłodzonego wrzenia błonowego przechodzi w nasycone wrzenie błonowe, a następnie w odparowanie mgły kropelek zawieszonych w parze. Powyższe trzy zakresy wrzenia charakteryzują się stosunkowo nieintensywnymi mechanizmami wymiany ciepła. Należy się jednak liczyć ze znacznymi przegrzaniem ścianki na całej długości kanału.

Mając powyższe na uwadze, zaleca się eksploatację różnego typu urządzeń, w których zachodzi dwufazowa wymiana ciepła, w zakresie stosunkowo niskich gęstości

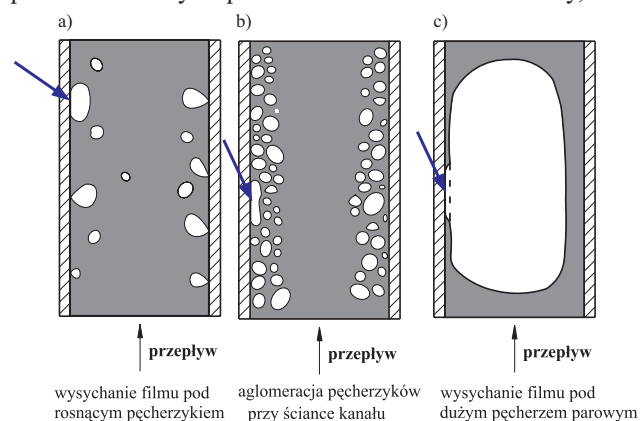
strumieni ciepła, tak, aby wykorzystywać struktury przepływu, gdzie współczynnik przemieszczania ciepła przyjmuje dużą wartość (tzn. obszar rozwiniętego wrzenia pęcherzykowego).

### 3. MECHANIZMY I MODELE OKREŚLAJĄCE KRYTYCZNY STRUMIEŃ CIEPŁA I I II RODZAJU

Zjawiska dotyczące przejścia jednego mechanizmu wrzenia w drugi nie są do końca poznane. Do wyznaczenia CHF w praktyce posługujemy się korelacjami opartymi na danych eksperymentalnych. Szacuje się, że w chwili obecnej istnieje około 400 korelacji dotyczących wrzenia w kanałach konwencjonalnych, głównie dla pionowego przepływu wody w rurze grzanej stałym strumieniem ciepła [1]. W niektórych przypadkach rozbieżności pomiędzy obliczeniami według różnych korelacji są znaczne. Istnieje kilka sposobów wyjaśnienia powstawania warunków kryzysu wrzenia. W przypadku przechłodzenia lub małego stopnia suchości w przepływie, występuje przepływ pęcherzykowy lub korkowy. Dla takiego przepływu można przedstawić trzy potencjalne mechanizmy wymiany ciepła - Whalley [5], (rys. 5).

Pierwszy z tych mechanizmów jest związany z parowaniem mikrowarstwy cieczy pod rosnącym pęcherzykiem na ogrzewanej ścianie (rys. 3a). Tuż przed oderwaniem się pęcherzyka, parowanie mikrowarstwy może pozostawić suchy obszar ścianki pod pęcherzykiem. Kontynuowane parowanie mikrofilmu na obwodzie suchego obszaru powoduje dalszy wzrost tego obszaru. Może to w konsekwencji prowadzić do wyschnięcia całej ścianki oraz powstania mechanizmu wrzenia błonowego na takiej ścianie.

Drugi mechanizm może występować dla średnich stopni przechłodzenia płynu. W takich przypadkach pęcherzyki mogą się zbierać w warstwie przyściennej w pobliżu ścianki (rys. 3b). Jeżeli gęstość występowania pęcherzyków oraz rozmiar warstwy przyściennej będą duże, to może okazać się, że dopływ cieczy do powierzchni ścianki będzie pogorszony. Ciecz występująca pod pęcherzykami, jak i ta je rozdzielająca może wówczas odparować oraz spowodować powstanie suchych plam na ścianie. Suche obszary, któ-



Rys. 5. Mechanizmy powstawania obszarów bez cieczy dla małych stopni suchości

re powstały w ten sposób, mogą się powiększać kosztem braku dopływu cieczy z rdzenia przepływu prowadząc w konsekwencji do wrzenia błonowego.

Trzeci mechanizm związany jest z przepływem korkowym w przepływie nasyconym o małym stopniu suchości. Podczas ruchu takiego dużego pęcherza przy dużym strumieniu ciepła powstaje na ścianie cienka warstwa cieczy oddzielająca pęcherz parowy od ścianki. Może ona odparować w pewnych lokalizacjach prowadząc do powstanie obszaru suchego, jak to pokazano na rysunku 3c.

W przypadku niewielkich i średnich strumieni ciepła odpowiadających średnim stopniom przegrzania ścianki, w przepływie pierścieniowym zmiana mechanizmu wymiany ciepła w obszarze krytycznym prowadzi do wysychania filmu cieczowego oraz przejścia do odparowania kropel z przepływu mgłowego. W obszarze przepływu mgłowego można wyodrębnić sześć różnych mechanizmów konwekcyjnej wymiany ciepła, a mianowicie:

1. konwekcyjną wymianę ciepła od ścianek do pary,
2. konwekcyjną wymianę ciepła od pary do porywanych kropelek,
3. odparowanie kropel zderzających się ze ścianką oraz zwilżających powierzchnię ścianki,
4. odparowanie kropelek, które zbliżają się do ścianki, ale nie zwilżają powierzchni,
5. radiacyjną wymianę ciepła od ścianki do kropelek,
6. radiacyjną wymianę ciepła od ścianki do pary.

Kompletny model wysychania filmu na ściance kanału jest bardzo złożony i trudny do formalnego zapisu mate-

matycznego. Pewną propozycję opisu podaje Azzopardi [6], lecz tak jak i wszystkie inne modele wysychania filmu cieczowego wymaga on wcześniejszej znajomości zależności opisujących porywanie kropel z tego filmu (ang. entrainment) oraz wytrącania się kropel z jądra przepływu (ang. deposition). Dotychczasowe modele opierają się na rozwiązaniu równania bilansu masy w filmie cieczowym płynącym po ścianie i próbuje się „odgadnąć” wartości strumienia porywanych kropel, strumienia wytrącających się kropel z jądra przepływu, jak również strumienia masy pary doprowadzonej do fazy parowej wynikającej z odparowania filmu cieczowego. Od szeregu dekad można odnotować badania związane ze strumieniem porywanych kropel oraz strumieniem wytrącających się kropel z jądra przepływu. Cały czas są to badania nie do końca przekonujące. Podawane są jedynie zależności empiryczne opisujące te procesy. Pewnym postępowaniem w badaniach procesu wysychania filmu było dodanie drugiego równania zachowania masy dla kropel w przepływie. Niestety wciąż, jak dotychczas, nie do końca rozpoznany jest mechanizm transportu masy pomiędzy fazami. W tym świetle, w opinii autorów, należy więcej uwagi skupić na zagadnieniu prawidłowego oszacowania strumienia masy odrywającej się z filmu i separującej się z jądra przepływu oraz masy pary odprowadzonej z filmu cieczowego do fazy parowej. Dotychczas w modelach przyjmowano, że strumień ciepła powodujący odparowanie był równy strumieniowi na ścianie. W rzeczywistości jest to strumień ciepła na granicy filmu i jądra parowo-kropkowego. Przyjęcie strumienia ciepła na ścianie jako odparowującego jest do zaakcepto-

Tabela 1. Korelacje krytycznego strumienia ciepła CHF wg [1]

| Struktura przepływu   | Model   | Autorzy   | Główne parametry  | Zależność na CHF  |
|---|---|---|---|---|
| Przepływ pęcherzykowy – małe stopnie suchości, przechłodzenie | 1) Model gromadzenia się pęcherzyków parowych                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Weisman &amp; Pei (1983)</li> <li>• Chang &amp; Lee (1989)</li> <li>• Kwon &amp; Chang (1999)</li> </ul> | - moment pędu lub turbulentny przepływ pomiędzy rdzeniem a warstwą pęcherzyków  | $CHF = G \cdot h_{lv} (x_0 - x_1) \cdot \frac{h_{i,s} - h_i}{h_l - h_i}$  |
|   | 2) Wysychanie warstewki cieczy pod warstwą parową               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lee &amp; Mudawar (1988)</li> <li>• Katto (1992)</li> <li>• Celata et al. (1994)</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- grubość filmu cieczowego</li> <li>- długość pęcherza parowego</li> <li>- prędkość pęcherza parowego</li> </ul> | $CHF = \frac{\rho_f \delta h_{lv}}{L_B} U_B$                              |
|   | 3) Wysychanie warstewki cieczy pod warstwą pęcherzyków parowych | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chun &amp; Chang (1999)</li> </ul>   | - efektywna długość parowania   | $CHF = \frac{G \cdot h_{lv}}{\pi D L_{evap}}$                             |
| Przepływ pierścieniowy – duże stopnie suchości                | 4) Wysychanie filmu cieczowego na ściance kanału                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Whalley et al. (1978)</li> <li>• Levy et al. (1981)</li> <li>• Katto (1984)</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- parowanie</li> <li>- porywanie kropel z filmu</li> <li>- wytrącanie się kropel z jądra przepływu</li> </ul>    | $\frac{dG_F}{dz} = \frac{4}{D} \left( D_d - E - \frac{q}{h_{lv}} \right)$ |

wania w przypadku bardzo cienkich filmów cieczowych, natomiast gdy te mają większe grubości, to strumień ciepła przyłożony na ściance jest częściowo wykorzystywany do podgrzewu samego filmu i nie cały uczestniczy w procesie odparowania. Takie podejście zostało zaprezentowane przez autorów w pracy [7].

Dotychczas przeprowadzono cały szereg badań dotyczących pomiarów oraz wyznaczania krytycznego strumienia ciepła. Jak dotąd niestety zjawisko gwałtownego spadku współczynnika przejmowania ciepła lub gwałtownego wzrostu temperatury ścianki pozostaje nie do końca zrozumiane i nadal pozostaje niewyjaśnione. W literaturze większość zależności opisujących krytyczny strumień ciepła odnosi się do przepływu wody i jest on wyznaczany na podstawie danych eksperymentalnych. Najbardziej znanymi korelacjami CHF dla wody są modele przedstawione w tabeli 1.

Jedną z lepszych ogólnych korelacji empirycznych jest korelacja Katto i Ohno (1984) [8], która jest modyfikacją korelacji Katto (1979) [9], korygującą pewne niezgodności tej ostatniej oraz poprawia jej dokładność. Korelacja składa się z szeregu kroków, które można sprowadzić do następującego algorytmu. Wyznaczamy stosunek gęstości pary do gęstości cieczy:

$$\gamma = \rho_v / \rho_l$$

oraz krytyczną liczbę Webera:

$$We_{kr} = \frac{G^2 L}{\rho_l \sigma}$$

Następnie wyznaczamy funkcję  $C_k$ , która przyjmuje różne wartości w zależności od odległości od wlotu:

$$C_k = 0.25 \quad \text{dla } L/D < 50 \quad (1a)$$

$$C_k = 0.25 + 0.0009 \left[ \left( \frac{L}{D} \right) - 50 \right] \quad \text{dla } 50 \leq L/D \leq 150 \quad (1b)$$

$$C_k = 0.34 \quad \text{dla } L/D > 150 \quad (1c)$$

W kolejnym kroku wyznaczamy kilka wersji krytycznego strumienia ciepła, z których użyta będzie jedna, w zależności od stosunku gęstości pary do gęstości cieczy:

$$q_{c1} = C_k G h_v We_K^{-0.043} \left( \frac{L}{D} \right)^{-1} \quad (2a)$$

$$q_{c2} = 0.1 G h_v \gamma^{0.13} We_K^{-1/3} \left[ \frac{1}{1 + 0.0031(L/D)} \right] \quad (2b)$$

$$q_{c3} = 0.098 G h_v \gamma^{0.13} We_K^{-0.433} \left[ \frac{(L/D)^{0.27}}{1 + 0.0031(L/D)} \right] \quad (2c)$$

$$q_{c4} = 0.0384 G h_v \gamma^{0.60} We_K^{-0.173} \left[ \frac{1}{1 + 0.280 We_K^{-0.233} (L/D)} \right] \quad (2d)$$

$$q_{c5} = 0.234 G h_v \gamma^{0.513} We_K^{-0.433} \left[ \frac{(L/D)^{0.27}}{1 + 0.0031(L/D)} \right] \quad (2e)$$

Wyznaczamy również następujące parametry:

$$K_{K1} = \frac{1.043}{3 C_k We_K^{-0.043}} \quad (3a)$$

$$K_{K2} = \left( \frac{5}{6} \right) \frac{0.0124 + D/L}{\gamma^{0.133} We_K^{-1/3}} \quad (3b)$$

$$K_{K3} = (1.12) \frac{1.52 We_K^{-0.233} + D/L}{\gamma^{0.60} We_K^{-0.173}} \quad (3c)$$

Dla  $\gamma < 0,15$  przyporządkowujemy następujące wielkości:

$$\text{dla } q_{c1} < q_{c2} \quad q_c = q_{c1} \quad (4a)$$

$$\text{dla } q_{c1} > q_{c2} \quad q_c = q_{c2} \quad \text{gdy } q_{c2} < q_{c3} \quad (4b)$$

$$\text{dla } q_{c1} > q_{c2} \quad q_c = q_{c3} \quad \text{gdy } q_{c2} \geq q_{c3} \quad (4c)$$

$$\text{dla } K_{K1} > K_{K2} \quad K_K = K_{K1} \quad (5a)$$

$$\text{dla } K_{K1} \leq K_{K2} \quad K_K = K_{K2} \quad (5b)$$

Dla  $\gamma \geq 0,15$  przyporządkowujemy następujące wielkości:

$$\text{dla } q_{c1} < q_{c5} \quad q_c = q_{c1} \quad (6a)$$

$$\text{dla } q_{c1} > q_{c5} \quad q_c = q_{c5} \quad \text{gdy } q_{c5} > q_{c4} \quad (6b)$$

$$\text{dla } q_{c1} > q_{c5} \quad q_c = q_{c4} \quad \text{gdy } q_{c5} \leq q_{c4} \quad (6c)$$

$$\text{dla } K_{K1} > K_{K2} \quad K_K = K_{K1} \quad (7a)$$

$$\text{dla } K_{K1} \leq K_{K2} \quad K_K = K_{K2} \quad \text{gdy } K_{K2} < K_{K3} \quad (7b)$$

$$\text{dla } K_{K1} \leq K_{K2} \quad K_K = K_{K3} \quad \text{gdy } K_{K2} \geq K_{K3} \quad (7c)$$

Krytyczny strumień ciepła jest wyznaczany z następującej zależności:

$$q_{CHF} = q_c \left( 1 + K_K \frac{h_{l,s} - h_i}{h_{lv}} \right) \quad (8)$$

Zależność Katto spełnia w sposób zadowalający dane dotyczące wrzenia w przepływie dla wody, R12, R22 oraz ciekłego helu dla średnic kanału około 1 cm i długości ogrzewanej równiej około 1 m, jak również dla masowego natężenia przepływu w zakresie od 120 do 2100 kg/m<sup>2</sup>s.

Groeneveld i inni (1986) [10] zaproponował prostą korelację opierającą się na znajomości pewnych wielkości bezwymiarowych:  $Bo = q_c / (G h_v)$ ,  $\rho_l / \rho_v$ ,  $\psi = (G^2 D / \sigma \rho_l)^{0.5}$ . Za pomocą tych parametrów z odpowiednich wykresów odczytuje się wartości krytycznego strumienia ciepła. Tego typu zależność charakteryzuje się niezłym dopasowaniem

do danych eksperymentalnych dotyczących wody, R11, R12, R21, R113, R114, CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>.

Badając kryzys wrzenia czynnika chłodniczego R 134a w przepływie w rurach pionowych, Vijayarangan i inni [11] dokonał modyfikacji korelacji Katto i Ohno [8] poprzez wprowadzenie dodatkowych wielkości: liczb Prandla i Reynoldsa:

$$\frac{q_{CHF}}{Gh_w} = 0.0051 \times \left[ \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.133} \left( \frac{\sigma \rho_l}{G^2 L} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{1}{1 + 0.0031(L/d)} \right) \right] \text{Pr}^{0.147} \text{Re}_i^{0.25} \quad (9)$$

Z kolei dla rur poziomych Merilo [12] przedstawił następującą zależność:

$$\frac{q_{CHF}}{Gh_w} = 575 \text{Re}^{-0.340} (Z^3 \text{Bo})^{0.358} \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{-2.18} \left( \frac{L}{D} \right)^{-0.511} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)^{1.27} (1 - x_{in})^{1.64} \quad (10)$$

gdzie:  $Z = \mu / (\rho \sigma D)^{0.5}$  – liczba Ohnesorga, natomiast  $\text{Bo} = \rho g D^2 / 4 \sigma$  – liczba Bonda. Dla czynników chłodniczych R 12 i R 143 oraz wody korelacja ta zapewnia dokładność na poziomie  $\pm 9\%$ .

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem zjawiska pierwszego kryzysu wrzenia II rodzaju, czyli związanego z wysychaniem filmu cieczowego na ścianie. Jest to zagadnienie cały czas aktualne i wciąż do końca nie posiadające precyzyjnego modelu jego przewidywania. Autorzy rozpoczęli intensywne badania tego mechanizmu i w nieodległej przyszłości spróbują podzielić się z czytelnikami wynikami badań.

#### LITERATURA

- [1] Chang S.H., Baek W.P.: *Understanding, predicting and enhancing critical heat flux*. The 10<sup>th</sup> Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003.
- [2] Kandlikar S.G.: *Critical Heat flux in subcooled flow boiling – an assessment of current understanding and future directions for research*, Multiphase Science and Technology, vol. 13, No. 3, 207-232, 2001.
- [3] Mikielwicz J., Mikielwicz D.: *Analiza możliwości wykorzystania ogólnych korelacji wrzenia w przepływie w technice chłodniczej*, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, 10, 389-397, 2001.
- [4] Mikielwicz D., Mikielwicz J., Tesmar J.: *Improved semi-empirical method for determination of heat transfer coefficient in flow boiling in conventional and small diameter tubes*, zgłoszone do International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006.
- [5] Whalley P.B.: *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Oxford University Press, 1996.
- [6] Azzopardi B., *Flow controlled critical heat flux: develop-*


#### Wykaz oznaczeń:

|                   |   |
|-------------------|---|
| D                 | – średnica kanału [m]   |
| L                 | – długość kanału [m]  |
| q                 | – gęstość strumienia ciepła [kW/m <sup>2</sup> ]              |
| x                 | – stopień suchości  |
| h                 | – entalpia [kJ/kg]  |
| h <sub>lv</sub>   | – ciepło parowania [kJ/kg]                                    |
| G                 | – masowe natężenie przepływu [kg/s]                           |
| δ                 | – grubość filmu cieczowego na ścianie [m]                     |
| ρ                 | – gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]                                |
| U <sub>B</sub>    | – prędkość przemieszczania pęcherza parowego [m/s]            |
| L <sub>B</sub>    | – długość pęcherza parowego [m]                               |
| L <sub>evap</sub> | – efektywna długość parowania [m]                             |
| Re                | – liczba Reynoldsa  |
| Bo                | – liczba Bonda  |
| We                | – liczba Webera   |
| Z                 | – liczba Ohnesorga  |
| D <sub>d</sub>    | – wytrącanie się kropeł z rdzenia przepływu (ang. deposition) |
| E                 | – porywanie kropeł z filmu cieczowego (ang. entrainment)      |
| CHF               | – krytyczny strumień ciepła [kW/m <sup>2</sup> ]              |
| σ                 | – napięcie powierzchniowe [MPa]                               |
| z                 | – długość kanału [m]  |

#### Oznaczenia indeksów:

|    |   |
|----|---|
| l  | – ciecz   |
| v  | – para  |
| s  | – nasycenie (ang. saturated)                      |
| i  | – granica fazy ciekłej i parowej (ang. interface) |
| F  | – film cieczowy                                   |
| k  | – wartość krytyczna                               |
| in | – wlot  |

*ments in annular flow modeling*, Archives of Thermodynamics, vol. 27, no.2, 1-20, 2006.

- [7] Mikielwicz D., Mikielwicz J., Gliński M., Wajs J.: *Modeling of dryout in annular flow*, zaakceptowane do prezentacji w ramach 6<sup>th</sup> Baltic Heat Transfer Conference, St. Petersburg, 16-19 września 2006.
- [8] Katto Y., Ohno H.: *An improved version of the generalised correlation of critical heat flux for the forced convective boiling in uniformly heated vertical tubes*. Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol. 27, 1641-1648, 1984.
- [9] Katto Y.: *A generalised correlation of critical heat flux for the forced convective boiling in vertical uniformly heated round tubes – A supplementary report*. Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol. 22, 783-794, 1979.
- [10] Groeneveld D.C., Kiameh B.P., Chang S.C.: *Prediction of critical heat flux (CHF) for non aqueous fluids in forced convective boiling*. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Heat Transfer Conference, Hemisphere, New York, vol. 5, 2209-2214, 1986.
- [11] Vijayarangan B.R., Jayanti S., Balakrishnan A.R.: *Studies on Critical Heat Flux in Flow Boiling at Near Critical Pressures*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49 259-268, 2006.
- [12] Merilo M.: *Fluid-to-fluid modelling and correlation of flow boiling crisis in horizontal tubes*, Int. J. Multiphase flow, vol. 5, 313-325, 1979. 

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006 - 2009  
jako projekt badawczy 3 T10B 003 30.