

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

64

WARSZAWA—POZNAŃ 1974

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

**THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW
MACHINERY**

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszera 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-02-13

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1974

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 400+90 egz.	Oddano do składania 10 X 1973 r.
Ark. wyd. 11,75. Ark. druk. 9,125	Podpisano do druku 18 V 1974 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w maju 1974 r.
Nr zam. 689/226.	D-4/448. Cena zł 36,—

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

JAROSŁAW MIKIELEWICZ

Gdańsk

Próba analizy teoretycznej kryzysów wrzenia w przepływie*

W oparciu o opracowaną w [1] i [2] półempiryczną teorię wymiany ciepła przy wrzeniu z przepływem, przeprowadzono analizę kryzysów wrzenia w przepływie. Podano kryteria wystąpienia kryzysów oraz zależności analityczne opisujące wymianę ciepła podczas kryzysów.

Spis symboli i oznaczeń

G – masowe natężenie przepływu,
 F – powierzchnia wymiany ciepła,
 q – strumień cieplny,
 R – współczynnik tarcia przepływu dwufazowego,
 r – ciepło parowania,
 s – poślizg między fazą ciekłą a gazową,
 t – temperatura,
 v – objętość właściwa,
 w – prędkość,
 x – stopień suchości w przepływie,
 α – współczynnik przejmowania ciepła,
 ζ – współczynnik tarcia przepływu jednofazowego,
 θ – kąt zwilżania,
 λ – przewodność cieplna,

σ – napięcie powierzchniowe.

Indeksy

b – wrzenie błonowe,
 i – iteracja,
 0 – początek strefy wrzenia,
 w – ścianka kanału,
 s – nasycenie,
 crI,II – krytyczna pierwszego lub drugiego rodzaju,
 iz – izotermiczna,
 niz – nieizotermiczna,
 pb – wrzenie „w objętości”,
 TP – przepływ dwufazowy,
 TPb – wrzenie w przepływie,
 min – minimalna.

1. Wprowadzenie

Kryzys wrzenia charakteryzuje się spadkiem współczynnika przejmowania ciepła, wywołanym zmianą mechanizmu przejmowania ciepła. Podczas wrzenia „w objętości” spadek współczynnika przejmowania ciepła występuje przy przejściu wrzenia „pęcherzykowego” na wrzenie „błonowe”. Natomiast przy wrzeniu w przepływie, mechanizm powstawania kryzysów jest bardziej złożony, zależny od warunków odparowania oraz od hydrodynamiki przepływu dwufazowego, utworzonego z odparowującej fazy ciekłej

* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 3.

oraz tworzącej się fazy parowej. W przepływie odparowującego czynnika mogą tworzyć się różne struktury przepływu dwufazowego, stwarza to duże trudności w analitycznym ujęciu zagadnienia kryzysu. Zjawisko kryzysów wrzenia w przepływie nie zostało jeszcze dotychczas dostatecznie dobrze wyjaśnione. Prowadzone są obecnie liczne prace eksperymentalne i teoretyczne w tym kierunku.

Na podstawie eksperymentów przeprowadzonych dla kryzysów wrzenia w przepływie, można rozróżnić dwa rodzaje kryzysów [3]:

Pierwszy rodzaj kryzysu jest analogiczny do kryzysu wrzenia „w objętości”, tzn. uwarunkowany jest przejściem wrzenia „pęcherzykowego” we wrzenie „błonowe”. Ten rodzaj kryzysu występuje najczęściej przy wrzeniu przechłodzonym lub, dla niektórych czynników, przy przepływie „pęcherzykowym”. Obserwuje się go przy bardzo wysokich strumieniach cieplnych. Dla tego rodzaju kryzysu określa się tzw. krytyczny strumień cieplny — q_{cr} .

Drugi rodzaj kryzysu występuje przy dużych stopniach suchości w przepływie, przy strukturze „pierścieniowej” lub „mgłowej” przepływu. Obserwuje się wówczas gwałtowne pogorszenie się wymiany ciepła, nawet przy małych wartościach strumienia cieplnego. Dla tego rodzaju kryzysu określa się tzw. graniczny stopień suchości w przepływie — x_q . Istnieje szereg hipotez, tłumaczących fakt pogorszenia się współczynnika przejmowania ciepła przy dużym stopniu suchości w przepływie.

2. Analiza kryzysów wrzenia w przepływie

Wymiana ciepła w przepływie dwufazowym jest zjawiskiem złożonym. Wpływa na nią nukleacja pęcherzyków parowych jak i przepływ konwekcyjny czynnika. Stąd też wielu autorów analizuje zjawisko kryzysów wrzenia w przepływie przyjmując, że strumień cieplny w tym przypadku jest kompozycją strumienia wywołanego generacją pęcherzyków parowych odpowiadający strumieniowi cieplnemu przy wrzeniu „w objętości” i strumienia cieplnego wywołanego ruchem konwekcyjnym czynnika. Rohsenow uważa, że zależność wiążąca oba te strumienie jest prostą superpozycją [4]. Na tej podstawie Gambill zaproponował zależność na strumień krytyczny, przy wrzeniu w przepływie dla niewielkich stopni suchości w przepływie przyjmując, że kryzys zachodzi wtedy, gdy strumień ciepła odpowiadający wrzeniu w objętości osiąga swoją maksymalną wartość [4]. Podobną metodę superpozycji strumieni zaproponował Levy rozszerzając ją na duże stopnie suchości w przepływie przez wprowadzenie strumienia korygującego zależnego od dyfuzji masy pary z jądra przepływu do filmu cieczowego na ścianie [4]. Zasadę prostej superpozycji kwestionuje w swej pracy Bergles i Rohsenow (cytowane za [4]) dochodząc poprzez eksperymenty do wniosku, że na zjawisko poważnie wpływa hydrodynamika wrzenia, która znacznie różni się przy wrzeniu „w objętości” i wrzeniu w przepływie.

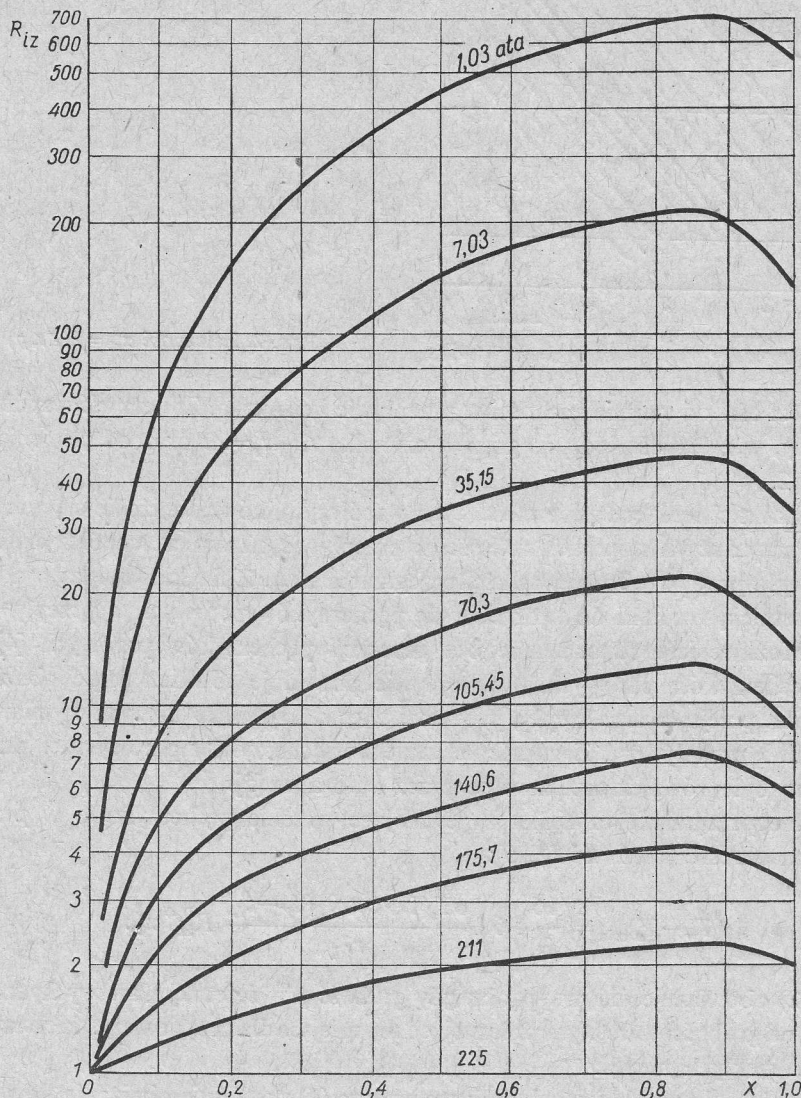
Autor doszedł do podobnego wniosku na drodze analitycznej. W pracach [1] i [2] wykazał, że współczynnik przejmowania ciepła dla wrzenia z przepływem α_{TP_b} zależy od współczynnika przejmowania ciepła, odpowiadającego warunkom wrzenia „w objętości” — α_{pb} , współczynnika przejmowania ciepła konwekcyjnego przepływu cieczy płynącej w ilości całkowitego natężenia przepływu dwufazowego α_0 oraz współczynnika tarcia prze-

pływu dwufazowego R_{iz} dla warunków izotermicznych, uwzględniającego hydrodynamikę przepływu dwufazowego.

Zależność ta przedstawia się następująco:

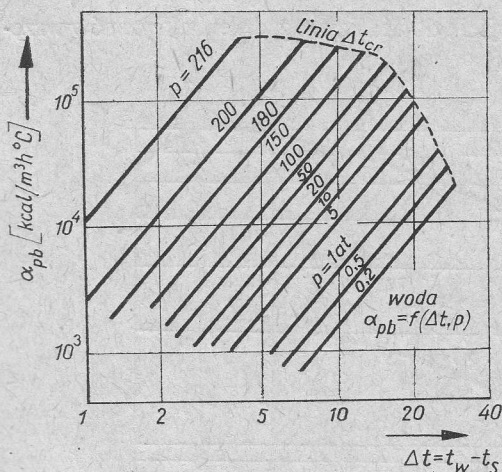
$$\frac{\alpha_{TPb}}{\alpha_0} = \sqrt{R_{iz}^{0,8} + \left(\frac{\alpha_{pb}}{\alpha_0}\right)^2}. \quad (1)$$

Powyższa zależność może służyć jako punkt wyjścia do analizy zagadnienia kryzysów wrzenia w przepływie.



Rys. 1. Zależność współczynnika tarcia przepływu dwufazowego R_{iz} od zawartości pary oraz ciśnienia dla układu woda-para

Analizując zależność (1) dochodzi się do wniosku, że zjawisko kryzysu związane z obniżeniem się wartości współczynnika przejmowania ciepła, może zajść na skutek obniżenia się wartości współczynnika tarcia — R_{iz} lub współczynnika przejmowania ciepła odpowiadającego wrzeniu „w objętości” α_{pb} . Charakter zmienności współczynnika tarcia R_{iz} przedstawiony jest przykładowo na rys. 1 — według badań Martinellego-Nelsona dla



Rys. 2. Zależność $\alpha_{pb} = f(\Delta t, p)$ dla wody

wody w zależności od stopnia suchości w przepływie i ciśnienia. Zmienność współczynnika α_{pb} dla wody, w zależności od przegrzania czynnika $t_w - t_s = \Delta t$ oraz od ciśnienia, przedstawia rys. 2.

Jak wynika z charakteru zmienności tych współczynników, obniżenie się wartości R_{iz} ma miejsce przy dużych stopniach suchości w przepływie, natomiast współczynnika przejmowania ciepła przy określonej wartości przegrzania Δt_{cr} . Z fizyki zjawiska wiadomo, że nie zawsze istnieją warunki do tworzenia się pęcherzyków parowych w przepływie dwufazowym. Możliwe jest odparowanie bez generacji pęcherzyków parowych [4]. Zanik generacji pęcherzyków parowych w przepływie powoduje również nagłe obniżenie się współczynnika przejmowania ciepła, prowadzi więc do zjawiska kryzysu wymiany ciepła przy wrzeniu z przepływem. Zagadnienie istnienia pęcherzyków parowych w przepływie dwufazowym było również analizowane przez autora w [5].

Minimalne przegrzanie czynnika zapewniające wrzenie pęcherzykowe w przepływie dwufazowym określa zależność [2, 5]:

$$(T_w - T_s)_{\min} = \left(\frac{16}{3} \div 6 \right) \frac{\sigma T_s (1 + \cos \theta) (v_v - v_L)}{r \lambda_L} R_{iz}^{0,4} \alpha_0. \quad (2)$$

Zależność (2) obowiązuje dla przypadku gdy grubość przyściennej warstwy hydraulicznej jest większa od grubości warstwy termicznej, co ma miejsce dla prawie wszystkich czynników z wyjątkiem ciekłych metali.

W zależności od tego, który składnik we wzorze (1) powoduje obniżenie się wypadkowego współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu z przepływem α_{TPb} , rozróżnia się kryzys pierwszego i drugiego rodzaju.

Kryzys pierwszego rodzaju związany z przejściem wrzenia „pęcherzykowego” we wrzenie „błonowe” może wystąpić w przypadku gdy:

$$\Delta t = \Delta t_{cr} \geq \Delta t_{min}. \quad (3)$$

Warunek ten rzadko jest spełniony, toteż kryzys pierwszego rodzaju dla wrzenia nasyczonego obserwuje się jedynie w specyficznych warunkach, np. przy wrzeniu cieczy kriogenicznych.

Wartość współczynnika przejmowania ciepła przy pierwszym kryzysie po wprowadzeniu warunku (3) do (1) będzie przedstawiać się następująco:

$$\left(\frac{\alpha_{TPb}}{\alpha_0}\right)_{crI} = \sqrt{R_b^{0,8} + \left(\frac{\alpha_{pb}}{\alpha_0}\right)_{cr}^2} \quad \text{gdy} \quad \Delta t = \Delta t_{cr}, \quad (4)$$

analogicznie krytyczny strumień cieplny

$$\left(\frac{q_{TPb}}{q_0}\right)_{crI} = \sqrt{R_b^{0,8} + \left(\frac{q_{pb}}{q_0}\right)_{cr}^2} \quad \text{gdy} \quad \Delta t = \Delta t_{cr}. \quad (5)$$

Blіszszego wyjaśnienia wymaga współczynnik tarcia przepływu dwufazowego R_b występujący w zależnościach (4) i (5). Dotyczy on takiego przypadku przepływu dwufazowego, w którym faza parowa w postaci błony występuje przy ścianie kanału, a wewnątrz kanału jest faza ciekła, jak to ma miejsce podczas pierwszego rodzaju kryzysu. Dla takiego przypadku nie spotkano w literaturze przedmiotu badań eksperymentalnych, ani też teoretycznych współczynnika tarcia przepływu dwufazowego.

Z badań eksperymentalnych pierwszego rodzaju kryzysu wiadomo, że wartość krytycznego współczynnika przejmowania ciepła maleje wraz ze wzrostem stopnia suchości w przepływie [3, 4]. Oznaczałoby to, że współczynnik R_b maleje również przy wzroście stopnia suchości w przepływie.

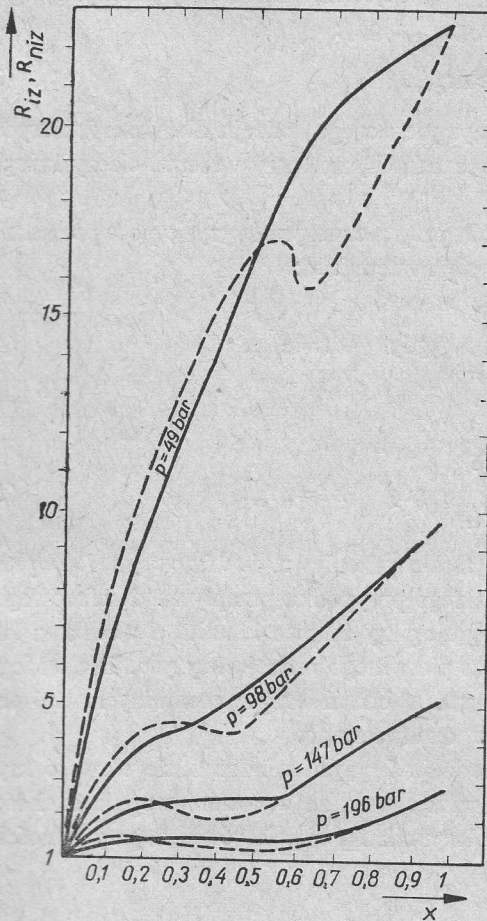
Kryzys drugiego rodzaju występuje, jak wskazują eksperymenty, przy dużych stopniach suchości w przepływie. Jak wynika z poprzedniej analizy, obniżenie się wartości współczynnika przejmowania ciepła można tłumaczyć zanikiem wrzenia pęcherzykowego w przepływie dwufazowym lub obniżeniem się wartości R_{iz} . Zanik wrzenia pęcherzykowego zachodzi gdy:

$$\Delta t \leq \Delta t_{min}, \quad (6)$$

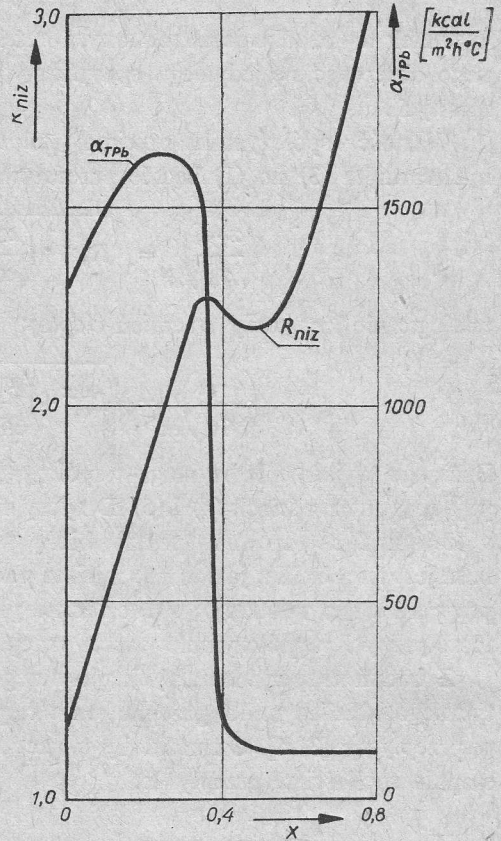
przy którym $\alpha_{pb}/\alpha_0 = 0$ i zależność (1) przechodzi w zależność na wartość krytyczną współczynnika przejmowania ciepła dla drugiego rodzaju kryzysu wrzenia.

$$\left(\frac{\alpha_{TPb}}{\alpha_0}\right)_{crII} = R_{crII}^{0,4} \quad \text{gdy} \quad \Delta t = \Delta t_{min}. \quad (7)$$

Do rezultatu (7) można dojść na innej drodze, analizując opory przepływu dwufazowego w kanale ogrzewanym. Eksperymentalną charakterystykę współczynnika tarcia dla mieszaniny dwufazowej z doprowadzeniem ciepła w zależności od stopnia suchości oraz ciśnienia przedstawia rys. 3, zaczerpnięty z [6]. Podobną charakterystykę uzyskano także w [7, 8]. Charakterystyka współczynnika tarcia mieszaniny dwufazowej, do której do-



Rys. 3. Zależność R od x dla mieszaniny dwufazowej z doprowadzeniem i bez doprowadzenia ciepła dla wody przy $\gamma_w = 2000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ [6];
 $R_{iz} \dots R_{niz}$



Rys. 4. Zależność współczynnika tarcia i współczynnika przejmowania ciepła mieszaniny dwufazowej wody od masowej zawartości fazy parowej, dla rury o średnicy 8 mm, przy 170 ata, $\gamma_w = 2220 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, $q = 450 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \text{h}$

prowadza się ciepło, wskazuje na istnienie kryzysu oporów tarcia, które występuje szczególnie silnie przy niższych ciśnieniach dla określonej wartości X . Okazuje się, jak stwierdzono w pracy [8], że przy tej wartości X zachodzi również kryzys współczynnika przejmowania ciepła, jak to przedstawia rys. 4 zaczerpnięty ze wspomnianej pracy [8]. Wynik ten jest zgodny z ogólną analogią między wymianą energii cieplnej i mechanicznej w przepływie. Większym współczynnikiem tarcia odpowiada zawsze większy współczynnik przejmowania ciepła. Dysypacja energii w przepływie, jak to wykazano w [1 i 2], jest związana ściśle z wymianą ciepła w przepływie.

Z rys. 3 wynika, że kryzys oporów zachodzi przy warunku

$$R_{niz} \cong R_{iz}.$$

(8)

Z addytywności energii dysypacji w przepływie dwufazowym wynika zależność na współczynnik tarcia mieszaniny dwufazowej z doprowadzeniem ciepła ζ_{TPb} [1, 2]:

$$\zeta_{TPb}^2 = \zeta_{TP}^2 + \zeta_{pb}^2. \quad (9)$$

Ponieważ zachodzą związki:

$$\zeta_{TPb} = R_{niz} \cdot \zeta_0,$$

$$\zeta_{TP} = R_{iz} \cdot \zeta_0,$$

$$\zeta_{pb} \sim \alpha_{pb} \sim q^{0,7},$$

z zależności (9) wynika, że aby zachodził stwierdzony eksperymentalnie warunek (8) musi zanikać wartość α_{pb} , co już wykazano poprzednio.

Kryzys oporów przepływu mieszaniny dwufazowej, do której doprowadzane jest ciepło można tłumaczyć w następujący sposób [3]. Dopóki film cieczowy na ściance kanału jest dostatecznie gruby, ulega falowaniu na powierzchni rozdziału faz, zwiększając tym samym opory przepływu. Na skutek doprowadzenia ciepła film ten odparowuje i jego grubość maleje. Przy bardzo cienkim filmie falowanie ustaje. Powoduje to zmniejszenie się oporów przepływu. Taki cienki film odparowuje już bardzo szybko co prowadzi do kryzysu wymiany ciepła.

Niezależnie od kryzysu związanego z zanikiem wrzenia pęcherzykowego w przepływie, może wystąpić kryzys związany z „wysychaniem” filmu cieczowego na ściance przy bardzo dużych stopniach suchości w przepływie, a więc wówczas, gdy współczynnik R_{iz} ulega obniżeniu (rys. 2).

Istotne dla praktyki jest określenie miejsca wystąpienia kryzysu. Może to być współrzędna długości kanału L_{cr} lub odpowiadający jej stopień suchości w przepływie X_{cr} .

Załóżmy, że znany jest z obliczeń cieplnych rozkład lokalnego strumienia cieplnego wzdłuż powierzchni wymiany ciepła kanału $x-q(F)$.

Dla strefy wrzenia nasyconego kanału obowiązuje zależność wynikająca z bilansu energetycznego:

$$rGdx = q(F) dF. \quad (10)$$

Całkując (10) otrzymuje się zależność:

$$x = \frac{1}{rG} \int_0^F q(F) dF \quad (11)$$

przy założeniu, że $F=0$ odpowiada $x=0$.

Zależność (11) pozwala na znalezienie $q[F(x)] = q(x)$. Natomiast wyrażenie

$$q(x) = \alpha_{TPb} \Delta t = \alpha_0 \sqrt{R^{0,8} + \left[\frac{\alpha_{pb}(\Delta t)}{\alpha_0} \right]^2} \cdot \Delta t, \quad (12)$$

pozwała na znalezienie zależności iteracyjnej na:

$$\Delta t(x)_i = \frac{q(x)}{\alpha_0 \sqrt{R(x)^{0,8} + \left[\frac{\alpha_{pb}(\Delta t_{i-1})}{\alpha_0} \right]^2}}, \quad (13)$$

a to z kolei na określenie x_{cr} dla zaniku wrzenia pęcherzykowego z warunku

$$\Delta t(x_{cr}) = \Delta t_{min}. \quad (14)$$

Mając x_{cr} z (11) można określić długość kanału, na której wystąpi kryzys drugiego rodzaju. Analogicznie z bilansu cieplnego można określić miejsce w kanale, w którym obniża się R_{iz} .

3. Wnioski

Wydaje się, że przedstawiona interpretacja zależności (1) dość dobrze tłumaczy jakościowo fakt istnienia obu rodzajów kryzysu wrzenia w przepływie.

Ilościowe ujęcie kryzysów według przedstawionej metody, wymaga dalszych badań teoretycznych i potwierdzenia eksperymentalnego. Szczególnie badań wymaga współczynnik tarcia przepływu dwufazowego dla wrzenia błonowego oraz granica zaniku wrzenia pęcherzykowego w przepływie dwufazowym.

Badany przez różnych autorów wpływ średnicy kanału, natężenia przepływu, przegrzania czynnika, chropowatości kanału, orientacji kanału w polu ciężkości, na zjawisko kryzysów jest ujęty w przedstawionej metodzie współczynnikami α_{pb} , R i α_0 . Stąd też, w celu precyzyjnego określenia parametrów kryzysu, należałoby znać dokładnie wartości tych współczynników, co wymaga dalszych badań teoretycznych i eksperymentalnych.

Możliwe jest wystąpienie w kanale odprowadzającym czynnik kilku ekstremów współczynnika przejmowania ciepła związanym z różnymi mechanizmami wrzenia, takimi jak: wrzenie błonowe, zanik wrzenia pęcherzykowego przy danych wartościach X oraz wysychaniem filmu cieczowego na ściance kanału przy dużych X odpowiadających maksimum R_{iz} .

Praca wpłynęła do Redakcji w maju 1972 r.

Literatura

- [1] J. Mikielewicz, *Półempiryczna metoda określania współczynnika wymiany ciepła przy wrzeniu przeschłodzonym i rozwiniętym podczas przepływu w kanale*. Materiały na Zjazd Termodynamików 1972 r. Praca złożona w Redakcji IMP.
- [2] J. Mikielewicz, *Wybrane zagadnienia generacji pary czynnika niskowrzącego w obiegu siłowni dwuczynnikowej*, Biuletyn IMP PAN nr 34/72/1972.
- [3] W. E. Doroszczuk, *Krizisy tieploobmienna pri kipienii wody w trubach*. „Energia”, Moskwa 1970.
- [4] L. S. Tong, *Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow*. John Wiley, New York 1965.
- [5] J. Mikielewicz, *O tworzeniu się fazy parowej podczas wrzenia z przepływem w generatorze pary siłowni dwuczynnikowej*. Prace IMP, z. 65, 1971.
- [6] N. W. Tarasowa, *Gidrawliczeskije soprotiwlenije pri kipienii wody i parowodjanoj smiesi w obogriewajemych trubach i kolcewych kanalach*. Tr. CKTI Kotłoturbinostrojenije, wyp. 57.
- [7] N. W. Tarasowa, A. I. Lieontiew, *Gidrawliczeskoje soprotiwlenije pri tieczeni parowodiannoj smiesi w obogriewajemoj wiertikalnoj trubie*. Tieplofizika wysokich tiempieratur. 1965, T. 3, No. 1.
- [8] Priżiakowski, I. N. Pietrowa, *Gidrawliczeskoje soprotiwlenija trub pri podiemnom dwizenii parowodjanoj smiesi s bolszimi skorostiami pri wysokom i swierchwysokom dawlenii*. Tieploenergietaika 1961, No 6.

Попытка теоретического анализа кризисов кипения в потоке

Резюме

Основываясь на доказанной автором в трудах [1] и [2] зависимости, связывающей теплоотдачи при кипении в потоке α_{TP} с коэффициентом теплоотдачи, отвечающим условиям кипения в объеме α_{pb} , а также с коэффициентом теплоотдачи, охватывающим конвекционный теплообмен двухфазного течения α_{TP} , проводится анализ условий появления кризисов теплообмена при кипении в потоке.

Сделан вывод, что одной из причин появления кризиса теплообмена оказывается замирание генерации паровых пузырьков в потоке.

Выводятся аналитические зависимости, описывающие теплообмен во время кризисов. Критический тепловой поток для кризиса первого рода описывается зависимостью (5), а коэффициент теплоотдачи для кризиса второго рода зависимостью (7). Представлен способ определения места в канале, в котором появится кризис второго рода.

Attempts at the Theoretical Analysis of Flow Boiling Crises

Summary

An analysis of the conditions for the occurrence of heat exchange crises in boiling flow is presented. The analysis is based on a relation, as proved by the author in [1] and [2], between the boiling flow heat transfer coefficient α_{TP} and the heat transfer coefficient for volume boiling α_{pb} as well as the heat transfer coefficient for the two-phase flow convection heat exchange α_{TP} . The conclusion was drawn that the collapse of vapour bubble generation within the flow is responsible for the occurrence of heat exchange crises.

Analytical formulas describing the heat exchange during the crises have been derived. Critical heat flux for a crisis of the first type is given by the formula (5) whereas the formula (7) describes the heat transfer coefficient for a crisis of the second type. A method is proposed whereby the location of the second type crisis along a channel can be determined.