

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

76

WARSZAWA-POZNAŃ 1978

---

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

---

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  
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ . ZENON ZAKRZEWSKI  
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,  
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, tel. 41-12-71

Copyright  
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1978  
Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 27 lutego 1978 r.
Ark. wyd. 12,25. Ark. druk. 9,375	Podpisano do druku 24 października 1978 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100 cm.	Druk ukończono w październiku 1978 r.
Nr zam. 319/98. J-14/662.	Cena zł 40,-

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

BOGDAN SEDLER, JAROSŁAW MIKIELEWICZ

Gdańsk

**Uproszczony model analityczny kryzysu wrzenia w przepływie\***

Przedstawiono prosty analityczny model kryzysu wrzenia, oparty na zjawisku wysychania filmu cieczowego i jednoczesnego wzbogacenia się fazą ciekłą jądra przepływu. Wyniki obliczeń porównano z badaniami eksperymentalnymi różnych autorów, w tym również z badaniami własnymi.

**Spis oznaczeń**

$c$ – stała przy strumieniach gęstości masy $D$ i $E$ ,	$q$ – gęstość strumienia cieplnego [ $W/m^2$ ],
$d$ – średnica wewnętrzna kanału [m],	$z$ – długość kanału [m],
$D$ – gęstość strumienia masy osadzających się kropeł cieczy [ $kg/m^2s$ ],	$\lambda$ – ciepło parowania [ $J/kg$ ].
$E$ – gęstość strumienia masy cieczy odrywającej się od filmu [ $kg/m^2s$ ],	Indeksy dotyczą
$G$ – gęstość strumienia całkowitego [ $kg/m^2s$ ],	$F$ – filmu cieczy,
	kr – parametrów krytycznych,
	0 – początku przepływu pierścieniowego.

**Wstęp**

Zjawiskiem kryzysu wrzenia w przepływie zajmuje się ostatnio kilka ośrodków. Prowadzi się wiele prac teoretycznych i eksperymentalnych w celu wyjaśnienia mechanizmów i warunków, w jakich powstają tzw. kryzysy wrzenia. Poznanie tych zjawisk jest niezwykle istotne dla projektowania generatorów pary, np. reaktorów jądrowych [8,9]. Kryzys wrzenia charakteryzuje się gwałtownym spadkiem współczynnika wymiany ciepła, zaburzeniami przepływu i pulsacjami ciśnienia.

Przyjęto rozróżnić dwa rodzaje kryzysu wrzenia. Kryzysy pierwszego rodzaju występują przy dużych strumieniach cieplnych. Na skutek silnego odparowania powstaje błona pary izolująca ściankę kanału od cieczy i w konsekwencji znacznie pogarszają się warunki wymiany ciepła; następuje tzw. przepała (burn-out). Kryzys drugiego rodzaju powstaje w warunkach zaniku filmu cieczy na ściance kanału przy przepływie pierścieniowym. Występuje on przy wyższych zawartościach fazy parowej w przepływie niż kry-

\* Praca wykonana w problemie międzyresortowym MR.I.26 „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”.



zys pierwszego rodzaju. Istnieje wiele badań eksperymentalnych, głównie dla wody [4, 6, 7, 8], oraz prób teoretycznego ujęcia tych eksperymentów [1, 2, 4, 7]. Przedstawione tam modele mają charakter fragmentaryczny i dotyczą w zasadzie opisu matematycznego przeprowadzonych przez tych autorów eksperymentów.

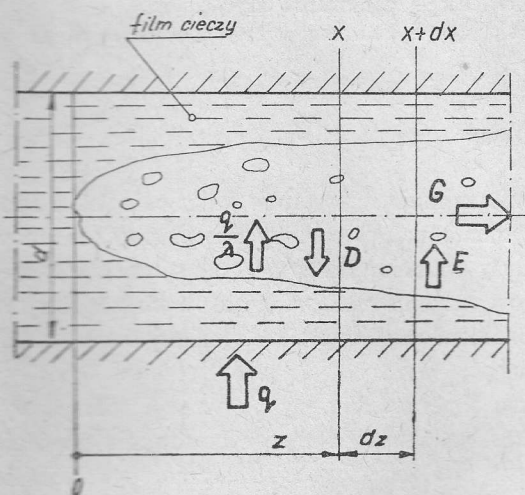
Ostatnio Hewitt [5] przedstawił bardziej ogólny model teoretyczny kryzysu wrzenia, oparty na zjawisku wysychania filmu cieczowego na ścianie podczas przepływu pierścieniowego. Model ten prowadzi do skomplikowanego programu obliczeniowego dając w rezultacie dość dobre wyniki w porównaniu z danymi eksperymentalnymi dla wody, a nawet innych czynników, jak np. freon-12.

Celem niniejszego opracowania jest podanie prostego analitycznego modelu kryzysu wrzenia opartego na zjawisku wysychania filmu cieczowego i jednoczesnego wzbogacenia się fazą ciekłą jądra przepływu. Przedstawiona próba jest pierwszym etapem pracy, dalsze będą zmierzały do uściślenia modelu.

Dla ilustracji przedstawiono porównanie wyników obliczeń z badaniami eksperymentalnymi różnych autorów, w tym również z badaniami własnymi.

### Model analityczny

Przyjęty do rozważań model obliczeniowy przedstawiono na rys. 1. Przez kanał o średnicy wewnętrznej  $d$  przepływa mieszanina dwufazowa parowo-cieczowa. Od pewnego miejsca kanału tworzy się przepływ pierścieniowy (annular flow). Zakłada się, że przypadek ten zachodzi na pewno przy stopniu suchości  $x \cong 0,01$  [11]. Do przepływu, na całej długości



Rys. 1. Model przepływu pierścieniowego w kanale generatora pary

kanalu, doprowadzany jest strumień cieplny o stałej gęstości  $q$  (co jest słuszne dla kanałów grzanych, np. elektrycznie). Całkowity wydatek czynnika wynosi  $G$ . Założono, że z powierzchni filmu odrywa się strumień masy cieczy w postaci kropelek  $E$ , zaś z jądra przepływu osadza się na powierzchni filmu strumień masy cieczy  $D$ .

Dla tak przyjętych założeń można napisać bilans masy cieczy w filmie i w jądrze przepływu w postaci równań różniczkowych:

$$\frac{dG_F}{dz} = \frac{4}{d} \left( D - E - \frac{q}{\lambda} \right), \quad (1a)$$

$$\frac{dG_E}{dz} = \frac{4}{d} (-D + E). \quad (1b)$$

Założono także, że strumień osadzającej się masy kropeł jest proporcjonalny do ilości cieczy w jądrze przepływu, zaś strumień cieczy odrywającej się od filmu – do ilości przepływu cieczy w filmie pokrywającym ściankę kanału. Wynikają stąd relacje:

$$D = c \cdot G_E, \quad E = c \cdot G_F. \quad (2a), (2b)$$

Przyjęto, że współczynnik proporcjonalności  $c$  jest stały. Przyjęcie współczynnika  $c$  jednakowego dla  $D$  i  $E$  ((2a) i (2b)), było dyskutowane. Stwierdzono, że przyjmując różne wartości  $c$  w (2a) i (2b) otrzymuje się rozwiązania niewiele odbiegające od rozwiązania uproszczonego zagadnienia, w którym  $c$  jest jednakowe dla (2a) i (2b). Z zależności (1a) i (1b) oraz (2a) i (2b) otrzymuje się układy równań:

$$\frac{dG_F}{dz} = \frac{4}{d} \left( c \cdot G_E - c \cdot G_F - \frac{q}{\lambda} \right), \quad (3a)$$

$$\frac{dG_E}{dz} = \frac{4}{d} (-c \cdot G_E + c \cdot G_F). \quad (3b)$$

Rozwiązania układu równań (3a) i (3b) mają postać:

$$G_F = m_1 + m_2 \cdot \exp(-8cz/d) - \frac{2qz}{d}, \quad (4a)$$

$$G_E = m_1 - m_2 \cdot \exp(-8cz/d) - \frac{2qz}{\lambda d} + \frac{q}{2\lambda c}. \quad (4b)$$

Dla warunków brzegowych

$$z=0, \quad G_F = G_{F0},$$

$$z=z_{kr}, \quad G_F = G_{Fkr},$$

stałe  $m_1$  i  $m_2$  wynoszą:

$$m_1 = \frac{G_{F0} \cdot \exp(-8cz_{kr}/d) - G_{Fkr} - (2qz_{kr}/\lambda d)}{\exp(-8cz_{kr}/d) - 1}, \quad (5a)$$

$$m_2 = \frac{G_{Fkr} - G_{F0} + (2qz_{kr}/\lambda d)}{\exp(-8cz_{kr}/d) - 1}. \quad (5b)$$

Wyznaczając z warunków brzegowych stałe, otrzymuje się zależności na ilość cieczy w filmie (grubość filmu) na ściance kanału i ilość cieczy w jądrze przepływu wzdłuż dłu-

gości kanału:

$$G_F = \frac{G_{F0} \cdot \exp(-8cz_{kr}/d) - G_{Fkr} - (2qz_{kr}/\lambda d)}{\exp(-8cz_{kr}/d) - 1} + \frac{G_{Fkr} - G_{F0} + (2qz_{kr}/\lambda d)}{\exp(-8cz_{kr}/d) - 1} \cdot \exp(-8cz/d) - 2qz/\lambda d = G_F(z), \quad (6a)$$

$$G_E = \frac{G_{F0} \cdot \exp(-8cz_{kr}/d) - G_{Fkr} - (2qz_{kr}/\lambda d)}{\exp(-8cz_{kr}/d) - 1} - \frac{G_{Fkr} - G_{F0} + (2qz_{kr}/\lambda d)}{\exp(-8cz_{kr}/d) - 1} \cdot \exp(-8cz/d) - 2qz/\lambda d + q/2\lambda c = G_E(z). \quad (6b)$$

Otrzymane równania pozwalają na określenie zależności stopnia suchości mieszaniny dwufazowej od długości kanału dla przypadku gdy zachodzi kryzys wrzenia.

Z bilansu masy cieczy w przepływie wynika:

$$G_F + G_E = (1 - x)G, \quad (7)$$

a z bilansu cieplnego

$$q_{kr} = (d/4) \cdot (G \cdot \lambda \cdot x_{kr}/z_{kr}). \quad (8)$$

Wprowadzając (7) i (8) do (6a) i (6b) otrzymano

$$x_{kr} = \frac{1 - \exp(-A) + 2(G_{F0}/G)\exp(-A) - 2(G_{Fkr}/G)}{[1 - \exp(-A)]/A + 1} = x_{kr}(z_{kr}), \quad (9)$$

$$A = (8c/d) \cdot z_{kr}.$$

Otrzymana zależność  $x_{kr}(z_{kr})$  pozwala (w sposób analityczny) na określenie stopnia suchości mieszaniny dwufazowej w miejscu kryzysu wrzenia.

Do obliczenia  $x_{kr}$  należy określić  $(G_{F0}/G)$  i  $(G_{Fkr}/G)$  na początku przepływu pierścieniowego i w miejscu kryzysu. Zwykle zakłada się [11], że stosunek ilości cieczy w filmie do całkowitego wydatku, dla początku przepływu pierścieniowego, wynosi  $(G_{F0}/G) \cong \cong 0,01$ .

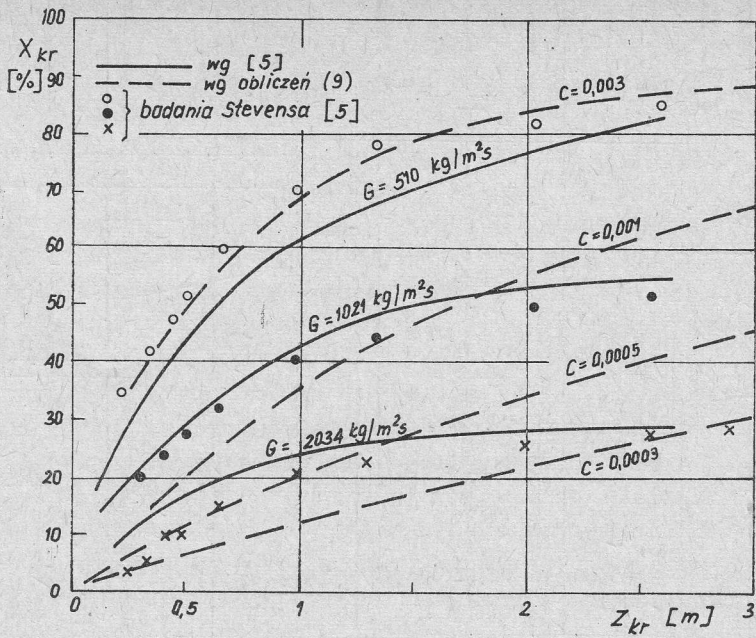
Stosunek ilości cieczy w filmie w miejscu kryzysu do wydatku całkowitego  $(G_{Fkr}/G)$  można określić np. według [3]. Dla wstępnych obliczeń można z dużą dokładnością założyć, że  $(G_{Fkr}/G) \cong 0$ . Stałą  $c$  należy dobrać metodą prób. Jak wykazują obliczenia, zależy ona głównie od ciśnienia, przy którym odbywa się przepływ.

### Dyskusja wyników obliczeń w konfrontacji z wynikami badań

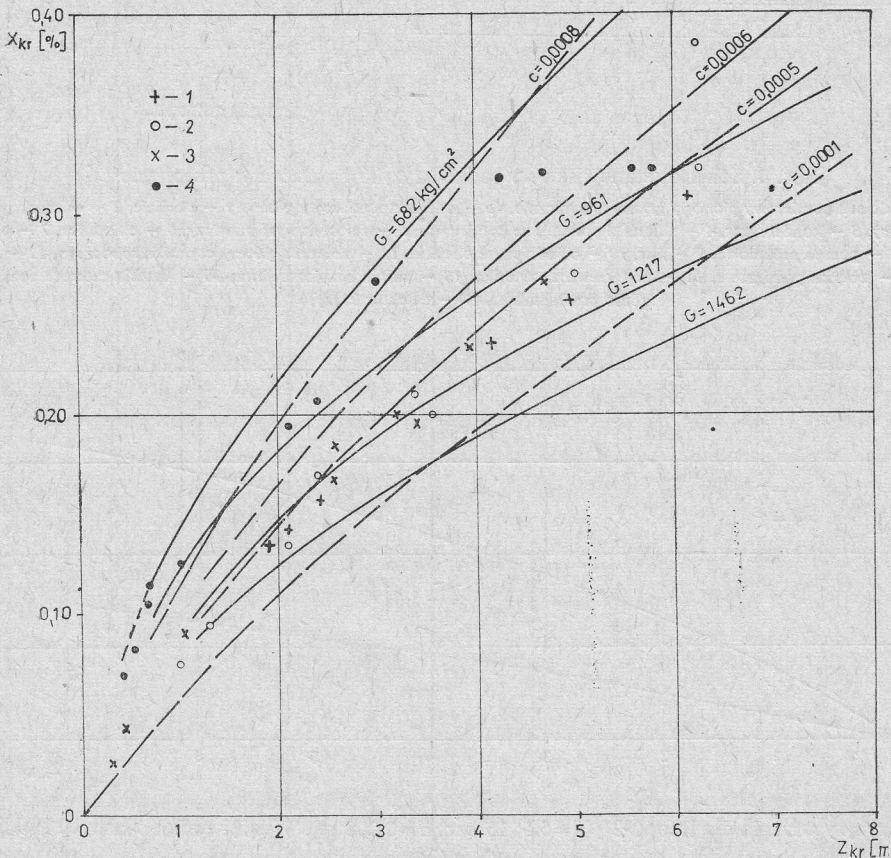
Na podstawie (9) dokonano obliczeń, których wyniki przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 5. Na rys. 2 podano wyniki badań eksperymentalnych Stevensa zawarte w [5] dla freonu-12 ( $p=10,5$  bar,  $d=8,5$  mm), dla różnych natężeń przepływu  $G$  oraz wyniki obliczeń według [5]. Dla porównania naniesiono wyniki obliczeń własnych według zależności (9) (linie przerywane).

Jak widać, dla przypadku gdy wydatek  $G=510$  kg/m<sup>2</sup>s, krzywa wykreślona według



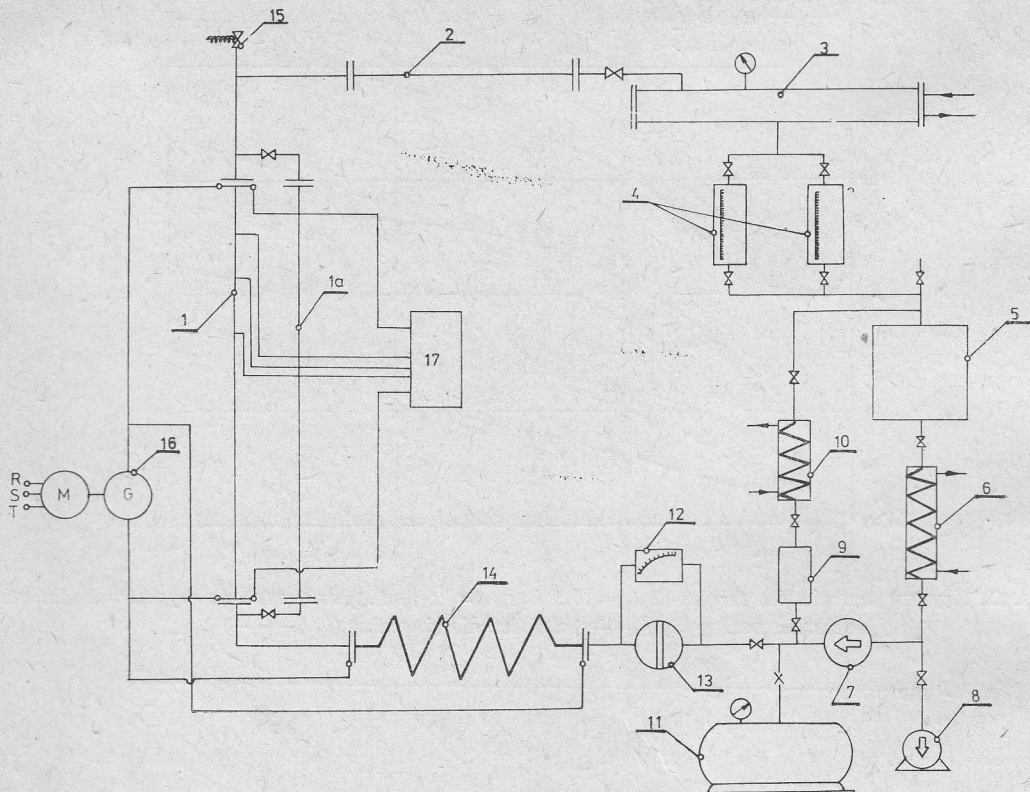


Rys. 2. Kryzysy wrzenia dla freonu-12 ( $p=10,5$  bar,  $d=8,5$  mm). Porównanie wyników badań i obliczeń według [5] (—) z obliczeniami według (9) (---)



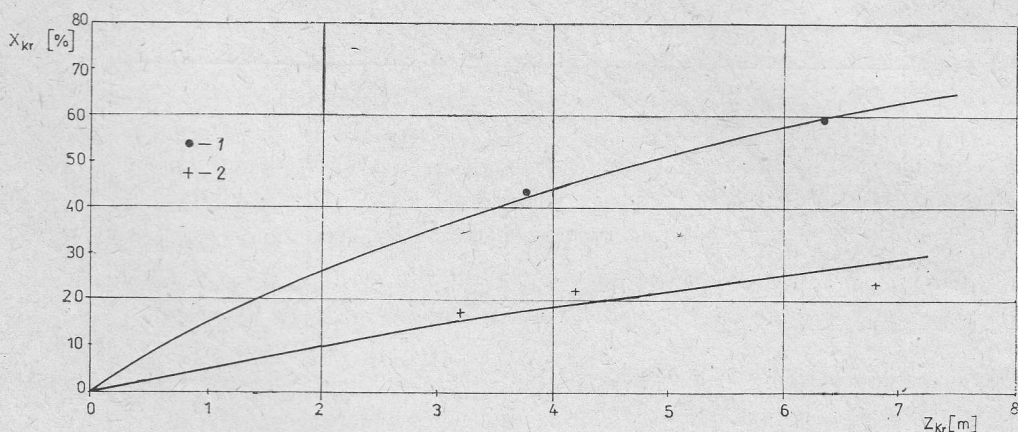
Rys. 3. Kryzysy wrzenia dla wody. Porównanie danych eksperymentalnych z obliczeniami według [5] (—) i (9) [---]

1 -  $G=1462$  kg/m<sup>2</sup>s, 2 -  $G=1217$  kg/m<sup>2</sup>s, 3 -  $G=961$  kg/m<sup>2</sup>s, 4 -  $G=682$  kg/m<sup>2</sup>s,  $d=0,032$  m,  $p=180$  bar



Rys. 4. Schemat stanowiska do badań kryzysów wrzenia w przepływie

1 – odcinek pomiarowy pionowy grzany elektrycznie, 1a – odcinek pomiarowy pionowy – obejście, 2 – odcinek pomiarowy poziomy, 3 – kondensator, 4 – zbiorniki pomiarowe kondensatu, 5 – zbiornik wyrównawczy, 6 – chłodnica, 7 – pompa obiegowa, 8 – pompa próżniowa, 9 – filtr, 10 – chłodnica na obejściu, 11 – zbiornik główny czynnika roboczego, 12 – waga zważki, 13 – zwężka pomiarowa, 14 – podgrzewacz czynnika, 15 – zawór bezpieczeństwa, 16 – bateria czterech spawarek, źródło prądu stałego, 17 – detektor kryzysu



Rys. 5. Kryzysy wrzenia dla freonu-21 ( $\beta=5,5$ ; 15 bar,  $d=0,008$  m). Wyniki badań własnych i obliczeń według (9)

1- $p=5,5$  bar,  $G=3500$  kg/m<sup>2</sup>s,  $c=0,00030$ ; 2- $p=15$  bar,  $G=7000$  kg/m<sup>2</sup>s,  $c=0,00010$



zależności (9) wykazuje bardzo dobrą zgodność z wynikami eksperymentu. Dla pozostałych przypadków zgodność ta pogarsza się. Następnie przeprowadzono porównanie wyników eksperymentów Chojnowskiego i Wilsona dla wody zamieszczonych w [5] z wynikami obliczeń według [5] i zależności (9). W tym przypadku zależność (9) daje dobrą zgodność z eksperymentem, o wiele lepszą niż obliczenia według [5].

Badania eksperymentalne kryzysów wrzenia czynników niskowrzących (freon-21) przeprowadzono również w laboratorium IMP-PAN. W tym celu zbudowano stanowisko eksperymentalne, którego schemat przedstawiono na rys. 4. Niektóre charakterystyczne parametry tego stanowiska przedstawionego w [10] są następujące: długość kanału pomiarowego pionowego – 4,22 m, stosunek średnic zewnętrznej do wewnętrznej – 12/8 mm (z możliwością wymiany na inne średnice), gęstość strumienia masy  $G = 1 \div 10 \cdot 10^3$  kg/m<sup>2</sup>, moc grzania prądem stałym – 100 kW, ciśnienie przepływu do 25 bar.

Wyniki badań własnych i obliczeń według zależności (9) przedstawia rys. 5. Jak się wydaje, uzyskana zgodność wyników obliczeń teoretycznych z badaniami eksperymentalnymi jest zadowalająca.

### Wnioski

Przedstawiony w pracy uproszczony model kryzysu wrzenia w przepływie wyraża się prostą zależnością (9). Jak wskazują obliczenia przeprowadzone dla znanych przypadków eksperymentalnych, dają one dość dobre wyniki. Trudność polega na określeniu stałej  $c$ , która w głównej mierze zależy od ciśnienia oraz częściowo od innych parametrów. Możliwe jest wprowadzenie tej stałej w postaci rozwiniętej, uwzględniającej inne parametry ( $p$ ,  $G$ ,  $x$ ). Otrzyma się wówczas bardziej rozbudowany model, który pozwoli na precyzyjniejsze określenie warunków kryzysowych w kanale. Jednakże, jak się wydaje, przedstawiony w pracy model może być użyteczny, o ile współczynnik  $c$  będzie dość dobrze określony. Wartość tego współczynnika może być wyznaczona z eksperymentów dla różnych czynników i parametrów.

W pracy nie zajmowano się uogólnianiem i znajdowaniem odpowiedniej korelacji na ten współczynnik, gdyż wymaga to przeprowadzenia analizy wielu danych eksperymentalnych, znacznie większej liczby niż przeprowadzono w niniejszej pracy i stanowi problem sam dla siebie. Jest również możliwe rozwinięcie modelu dla przypadku, gdy gęstość strumienia ciepła nie jest wartością stałą, ale zmienia się w dowolny sposób wzdłuż długości kanału.

Dalsze prace w tym kierunku, zarazem eksperymentalne jak i teoretyczne, być może wyjaśnią skomplikowaną naturę kryzysów wrzenia i pozwolą na przeprowadzenie dalszych uogólnień.

Praca wpłynęła do Redakcji w lutym 1977 r.

### Literatura

- [1] J. Mikielewicz, *Próba analizy teoretycznej kryzysów wrzenia w przepływie*. Prace IMP, z. 64, 1974.
- [2] J. Mikielewicz, *Wybrane zagadnienia generacji pary czynnika niskowrzącego w obiegu siłowni dwuczynnikowej*. Biuletyn IMP PAN, nr 34/720/1972.

- [3] J. Mikielawicz, J. R. Moszyński, *Minimum Thickness of a Liquid Film Flowing Vertically Down a Solid Surface*. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 19, pp. 771 - 776, 1976.
- [4] L. S. Tong, *Boiling Crisis and Critical Heat Flux*. A. S. Atomic Energy Commission Office of Information Services, 1972.
- [5] P. B. Walley, P. Hutchinsen, G. F. Hewitt, *The Calculation of Critical Heat Flux in Forced Convection Boiling*. Fifth Intern. Heat Transfer Conference, Japan, Sept. 3 - 7, vol. II, 1974.
- [6] W. E. Doroszczuk, *Kryzisy ciepłobmiennia pri kipieniu wody w trubach*. Energija, Moskwa 1970.
- [7] M. Cumo, M. Moronesi, G. Palazzi, *A Burn-out Correlation to Scale Water with Freon*. European Two-Phase Flow, Group Meeting, Harwell, June 1974.
- [8] M. Cumo, G. E. Farello, G. Maciucia, *Direct and Indirect Heating Effect in the DNB Tests for Sodium Heated Steam Generators for L.M.F.B.R's*. Comitato Nazionale Energia Nucleare, RT/ING, 22, 1974.
- [9] A. Jezierski, M. Trela, *Studia nad kryzysami przy wrzeniu, przebiegającym w warunkach konwekcji swobodnej i wymuszonej*. Biuletyn IMP PAN, nr 75/749/73.
- [10] B. Sedler, A. Jezierski, W. Tarasewicz, *Kryzisy wrzenia w przepływie czynników niskowrzących. Stanowisko eksperymentalne, koncepcja badań*. Opracowanie wewn. IMP PAN nr 984, 1976.
- [11] G. F. Hewitt, H. Hall-Taylor, *Kolcezyje dwuchfaznyje tieczenia*. Energija, Moskwa 1974 (przeład z języka angielskiego).

### Упрощенная аналитическая модель кризиса кипения в течении

#### Резюме

На основе модели кризиса кипения, базирующей на явлениях высыхания жидкостной пленки и обогащения ядра течения жидкой фазой (рис. 1), выведена простая аналитическая зависимость (9) степени сухости пара в месте кризиса кипения  $x_{kr}$  от длины кипения  $z_{kr}$ , считаемой от начала образования кольцевого течения.

Модель основана на балансе жидкой фазы в ядре течения, а также в жидкостной пленке покрывающей стенку канала. Получена система двух дифференциальных линейных уравнений первого порядка. Решение этой системы вместе с краевыми условиями довольно хорошо аппроксимирует результаты экспериментальных исследований различных авторов, в том числе также и собственных исследований. Кажется, что представленная в работе модель может быть полезной в инженерских расчетах после определения экспериментальных постоянных, выступающих в модели.

### Simplified Analytical Model of Flow Boiling Crisis

#### Summary

A formula, (9) for the vapor dryness ratio at the boiling crisis location  $x_{kr}$  as dependent on the boiling length,  $z_{kr}$  (measured from the initial point of the annular flow development), has been derived in the paper. The derivation was based on a model of boiling crisis taking into account the phenomenon of liquid film drying up and enrichment of the flow core with the liquid phase (Fig. 1).

The model has been based on the balance of the liquid phase in the flow core and in the liquid film over the channel wall. A set of two linear differential equations of the first order has been obtained. The solution of this set together with boundary conditions gives a satisfactory approximation of experimental results obtained by various authors, including the authors of this paper. The model presented in the paper can be regarded as useful for design purposes after the determination of experimental constants used in the model.