

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

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPŁYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

80

WARSZAWA—POZNAŃ 1981

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

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

RADA REDAKCYJNA - EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ROMUALD PUZYREWSKI
KAZIMIERZ STELLER (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · ROBERT SZEWAŁSKI
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1981

Printed in Poland

ISBN 83-01-02692-8

ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz. Ark. wyd. 10. Ark. druk. 7,5 Papier druk. sat. kl. V,
70 g. 70×100 cm. Oddano do składania 26 kwietnia 1980 r. Druk ukończono
w lutym 1981 r. Zamówienie nr 486/34, T-2/778. Cena zł 40,-

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

BOGDAN SEDLER

Gdańsk

Analiza kryzysów wrzenia w przepływie czynników niskowrzących*

W pracy przedstawiono model analityczny kryzysu wrzenia przy dużej zawartości fazy parowej w przepływie (przepływ pierścieniowy) oraz własne badania eksperymentalne kryzysów wrzenia freonu-21. Model analityczny oparty jest na analizie procesu wysychania filmu cieczy na ścianie i umożliwia sformułowanie równań różniczkowych bilansu masy cieczy w filmie i w jądrze przepływu.

Rozwiązanie wyprowadzonych równań wyraża się poprzez parametry trudne do teoretycznego wyznaczenia. Parametry te wyznaczono eksperymentalnie na podstawie badań własnych i innych autorów.

Wykaz oznaczeń

- | | |
|---|---|
| C – parametr w równaniach wymiany masy, | z^+ – bezwymiarowa współrzędna ($z^+ = z/d_0$), |
| c – koncentracja kropeł w jądrze przepływu, | q – gęstość strumienia cieplnego, |
| D – gęstość strumienia masy kropeł wytrącających się z jądra przepływu, | q^+ – bezwymiarowa gęstość strumienia cieplnego, |
| d – bezwymiarowa gęstość strumienia masy ($d = D/G$), średnica kanału (indeks 0), | ρ – gęstość właściwa, |
| E – gęstość strumienia masy kropeł odrywających się z powierzchni filmu, | σ – napięcie powierzchniowe, |
| e – bezwymiarowa gęstość strumienia masy ($e = E/G$), | μ – lepkość dynamiczna, |
| G – gęstość strumienia masy, | ν – lepkość kinematyczna. |
| g – bezwymiarowa gęstość strumienia masy, | |
| K – parametr w równaniach wymiany masy, | |
| k – współczynnik wymiany masy, | |
| p – ciśnienie, | |
| r – ciepło parowania, | |
| S – stała bezwymiarowa ($S = Y_{z_{kr}}/2x_{kr}$), | |
| t – parametr bezwymiarowy ($t = x_{kr}(z^+ / z_{kr}^+)$), | |
| V – bezwymiarowa objętość właściwa ($V = v_L/v_G$), | |
| v – objętość właściwa, | |
| x – stopień suchości, | |
| Y – parametr, | |
| z – współrzędna długości kanału, | |

Indeksy dotyczą:

- | |
|--|
| a – przepływu pierścieniowego, |
| b – wrzenia, |
| c – kropeł w jądrze przepływu, |
| E – strumienia masy kropeł odrywających się z powierzchni filmu, |
| D – strumienia masy kropeł wytrącających się z jądra przepływu, |
| F – filmu cieczy, |
| G – gazu, |
| j – jądra przepływu, |
| kr – kryzysu wrzenia, |
| L – cieczy, |
| 0 – początku przepływu pierścieniowego, średnicy kanału. |

* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR. I. 26, „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”, grupa tematyczna 06.

1. Wstęp

Zjawisko kryzysu wrzenia występuje w wielu urządzeniach technicznych, takich jak: reaktor jądrowy, generator pary, parownik chłodniczy itp. W przypadku reaktorów jądrowych, kotłów parowych i innych urządzeń technicznych o wysokich parametrach, w których występuje przepływ mieszaniny para-ciecz, kryzys wrzenia może prowadzić do poważnych następstw, jak np. awaria reaktora jądrowego lub kotła parowego wskutek przepału kanałów parowych. W przypadku generatorów pary o niskich parametrach, pracujących np. na czynniki niskowrzące, kryzys powoduje obniżenie intensywności wymiany ciepła i jest niepożądany ze względów technicznych. Perspektywy zastosowania takich generatorów pary są coraz szersze. Oprócz techniki chłodniczej, czynniki niskowrzące stosuje się w chemii do wykorzystania ciepła odpadowego procesów chemicznych. Nowe, perspektywiczne obiegi energetyczne przewidują zastosowanie turbiny na czynniki niskowrzące w systemach wykorzystujących energię słoneczną lub też geotermalną.

Kryzys wrzenia charakteryzuje się nagłym spadkiem współczynnika wymiany ciepła, spowodowanym zmianą mechanizmu wymiany ciepła. Maksymalny strumień ciepły występujący podczas kryzysu wrzenia nazywany jest krytycznym strumieniem cieplnym. Wiele badań na przestrzeni ostatnich piętnastu lat dotyczyło mechanizmu kryzysów wrzenia i sposobu ich obliczania. Niestety problem jest bardzo złożony i jak na razie nie ma zadowalających rozwiązań. Z wyjątkiem pewnych prostych modeli, brak jest analitycznych studiów nad zjawiskiem kryzysu wrzenia. Istnieje natomiast pokaźna liczba danych eksperymentalnych, które dotyczą na ogół wody. Dane te trudno jest uogólnić.

Rozróżnia się wiele rodzajów kryzysów wrzenia. Ich mechanizm fizyczny związany jest z podstawowymi rodzajami przepływu: pęcherzykowym, pierścieniowym, prostopadłym do osi cylindra. Kryzys występuje również podczas wrzenia w objętości. Szczególnie ważne z punktu widzenia zastosowań technicznych jest zjawisko kryzysu wrzenia występujące w przepływie pierścieniowym przy dużych zawartościach fazy parowej, tzw. „kryzys drugiego rodzaju”. Dla tego rodzaju kryzysu określa się jako wielkość charakterystyczną tzw. krytyczny (graniczny) stopień suchości w przepływie x_{kr} . Ogólna teoria tego zjawiska nie jest znana, istnieje jedynie wiele hipotez i fragmentarycznych badań teoretycznych [1, 3, 5-10].

Rozbieżności w uzyskanych rezultatach eksperymentalnych są znaczne [7]. Przedstawione przez różnych autorów badania dotyczyły przeważnie szczególnych przypadków, dla których określenie warunków kryzysu było niezbędne, ze względu na konkretne potrzeby rozwijającej się techniki. Tak było w przypadku nowych reaktorów jądrowych.

Ostatnio Hewitt [3, 4] 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 badaniami eksperymentalnymi dla wody, a nawet innych czynników, jak np. freon-12.

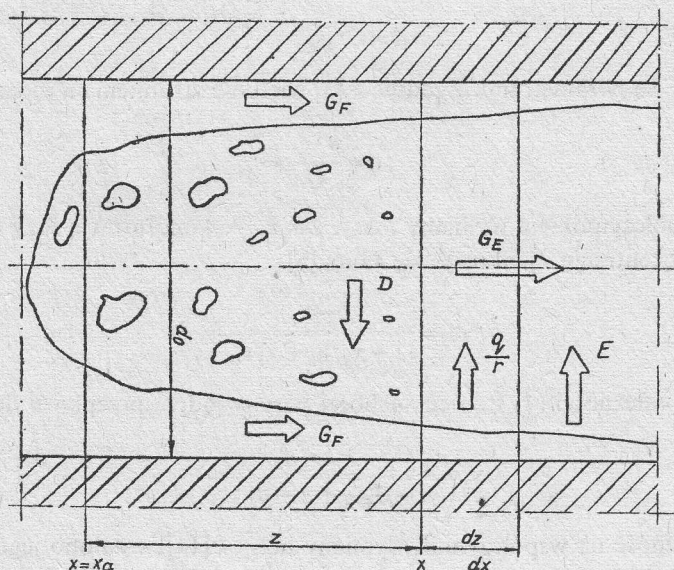
W niniejszej pracy przedstawiono model kryzysu wrzenia podczas przepływu pierścieniowego oraz badania eksperymentalne kryzysów wrzenia freonu-21.

Opierając się na analizie procesu wysychania filmu cieczy na ścianie sformułowano

równania różniczkowe bilansu masy cieczy w filmie i w jądrze przepływu. Rozwiązanie wyprowadzonych równań wyraża się poprzez parametry trudne do teoretycznego wyznaczenia. Parametry te wyznaczono eksperymentalnie na podstawie badań własnych i innych autorów.

2. Model teoretyczny kryzysu wrzenia w przepływie

Rozpatrzmy kanał o średnicy wewnętrznej d_0 , w którym przepływa czynnik o natężeniu całkowitym G tworząc strukturę pierścieniową, tzn. na ściance kanału istnieje film cieczy, a w rdzeniu przepływu dwufazowego przepływa para z zawieszonymi kropelkami cieczy (rys. 1). Przyjęto, że istnieje możliwość określenia miejsca tworzenia się takiej struktury, a następnie przeprowadzono bilans masy cieczy w filmie oraz w jądrze przepływu. Jako kryterium kryzysu przyjęto moment wyschnięcia filmu cieczowego na ściance kanału. W rzeczywistości, jak wskazują ostatnie badania [10], film przed całkowitym wyschnięciem ulega rozpadowi na strugi. Dla uproszczenia założono, że zjawisko kryzysu występuje przy gęstości strumienia filmu równej zero. Założenie to analizowano w [11] i wykazano, że wpływa ono nieznacznie na rezultaty.



Rys. 1. Model przepływu pierścieniowego z wrzeniem

Strumień cieplny q doprowadzany do ścianki kanału powoduje odparowanie z powierzchni filmu cieczowego strumienia pary w ilości q/r . Jednocześnie z procesem odparowania przebiega proces zrywania się kropelek cieczy z powierzchni filmu. Strumień tych kropelek określamy jako E . Z jądra przepływu separują się kropelki cieczy, których strumień oznaczamy przez D . Strumień ten zasila przepływ filmu (rys. 1).

Zgodnie z przyjętym modelem, zmianę masy filmu dG_F oraz masy cieczy w jądrze przepływu dG_E , na długości elementarnej dz , zapisuje się wzorami

$$\frac{dG_F}{dz} = \frac{4}{d_0} \left(D - E - \frac{q}{r} \right),$$

$$\frac{dG_E}{dz} = \frac{4}{d_0} (-D + E),$$

lub w postaci bezwymiarowej

$$\frac{dg_F}{dz^+} = 4(d - e - q^+), \quad (1a)$$

$$\frac{dg_E}{dz^+} = 4(-d + e), \quad (1b)$$

gdzie

$$d = D/G, \quad e = E/G, \quad q^+ = q/rG, \quad z^+ = z/d_0.$$

Aby rozwiązać układ równań różniczkowych (1a), (1b) wymagana jest znajomość strumieni d i e . W tym celu przyjęto następujące założenia:

$$e = K \cdot C \cdot g_F, \quad (2)$$

$$d = C \cdot g_E, \quad (3a)$$

przy czym K i C są parametrami. Zgodnie z [3] wielkość strumienia d można określić jako

$$d = \frac{k \cdot c_j}{G}, \quad (3b)$$

gdzie k jest współczynnikiem wymiany masy, zaś c_j – koncentracją fazy ciekłej w jądrze przepływu. Koncentrację c_j określa się jako [5]

$$c_j = \frac{1 - x_j}{(1 - x_j)v_L + x_j v_G}. \quad (4)$$

Występujący w zależności (4) stopień suchości pary w jądrze przepływu definiuje się jako

$$x_j = \frac{G_p}{G - G_F} = \frac{1 - g_E - g_F}{1 - g_F}. \quad (5)$$

Analizując zależność na współczynnik wymiany masy k [14], ustalono jego postać ogólną

$$k = C_k \frac{G^n}{d_0^m} (1 - g_F - g_E)^n, \quad (6)$$

przy czym C_k jest funkcją własności czynnika i parametrów przepływu czynnika dwufazowego ($v_G, \mu_G, T, \rho_c, v_c, d_c, \dots$), zaś m i n – wykładnikami potęg bliżej nie znanymi.

W efekcie korzystając z wzorów (2), (3a) i (3b) oraz (4)÷(6), otrzymuje się

$$d = C'_k \frac{g_E(1 - g_F - g_E)^n}{g_E v_L + (1 - g_F - g_E) v_G} \quad (7)$$

oraz

$$e = KC'_k \frac{g_F(1-g_F-g_E)^n}{g_E v_L + (1-g_F-g_E)v_G}, \quad (8)$$

gdzie

$$C'_k = C_k \frac{G^{n-1}}{d_0^m}. \quad (9)$$

Ostatecznie z zależności (1a), (1b), (7) i (8) otrzymano nieliniowy układ równań różniczkowych pierwszego rzędu, opisujący zmianę względnego natężenia przepływu cieczy w filmie na ścianie kanału oraz zmianę względnego natężenia przepływu cieczy w jądrze przepływu:

$$\frac{dg_F}{dz^+} = 4 \left[C'_k \frac{g_E(1-g_F-g_E)^n}{g_E v_L + (1-g_E-g_F)v_G} - KC'_k \frac{g_F(1-g_F-g_E)^n}{g_E v_L + (1-g_E-g_F)v_G} - q^+ \right], \quad (10a)$$

$$\frac{dg_E}{dz^+} = 4 \left[-C'_k \frac{g_E(1-g_F-g_E)^n}{g_E v_L + (1-g_E-g_F)v_G} + KC'_k \frac{g_F(1-g_F-g_E)^n}{g_E v_L + (1-g_E-g_F)v_G} \right]. \quad (10b)$$

Z układu równań różniczkowych (10a) i (10b) dochodzi się po przekształceniach do równania różniczkowego nieliniowego pierwszego rzędu na zmianę względnego natężenia przepływu cieczy w filmie w postaci

$$\frac{dg_F}{dt} = S \frac{(1-g_F-g_E)^n(g_E - Kg_F)}{g_E V + 1 - g_E - g_F} - 1, \quad (11)$$

przy czym

$$t = x_{kr} \frac{z^+}{z_{kr}^+}, \quad (12)$$

$$S = \frac{4z_{kr}^+ C'_k}{x_{kr} v_G} = \frac{Y \cdot z_{kr}}{2x_{kr}}, \quad (13)$$

$$V = v_L/v_G, \quad (14)$$

zaś strumień ciepły q^+ występujący w zależności (10a) w postaci bezwymiarowej, można przedstawić następująco:

$$q^+ = \frac{x_{kr}}{4z_{kr}^+}. \quad (15)$$

Według Hewitta [3] przepływ pierścieniowy zachodzi na pewno, gdy stopień suchości, zdefiniowany jako stosunek ilości pary do całkowitego przepływu, wynosi 0,01, oraz ilość cieczy filmu na początku przepływu pierścieniowego stanowi około 0,01 całkowitej ilości cieczy w przepływie. Jak wykazały obliczenia numeryczne przeprowadzone przez grupę Hewitta, przyjęcie nieco innych wartości stopnia suchości na początku przepływu pierścieniowego niż $x_0 = 0,01$ nie wpływa zasadniczo na wyniki obliczeń kryzysu wrzenia.

Z całkowania równań (1a), (1b) oraz (12) wynika warunek początkowy dla równania (11)

$$g_F + g_E = g_{F0} + g_{E0} - t, \quad (16a)$$

który zgodnie z powyższym możemy zapisać jako

$$g_F + g_E = 0,99 - t. \quad (16b)$$

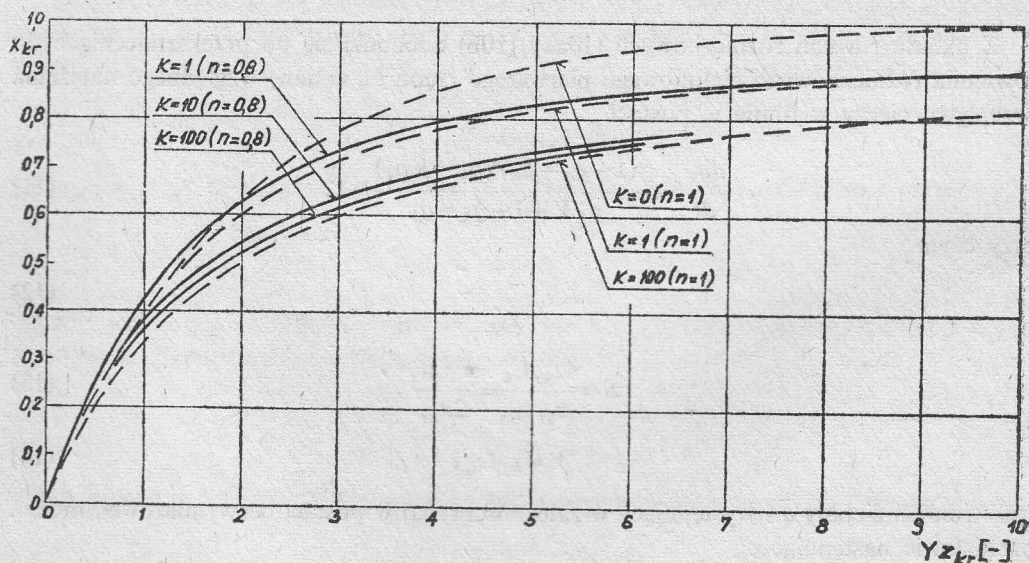
Przyjmując dalej, że

$$\bar{t} = t + 0,01, \quad (17)$$

otrzymuje się przekształconą postać równania (11)

$$\frac{dg_F}{d\bar{t}} = S \frac{\bar{t}^n [1 - \bar{t} - g_F(1 + K)]}{(1 - \bar{t} - g_F)V + \bar{t}} - 1. \quad (18)$$

Równanie (18) nie daje się rozwiązać metodami analitycznymi. Rozwiązano je metodą numeryczną zadając wartości K, n, V . W wyniku otrzymano zależność krytycznego stopnia suchości x_{kr} od współrzędnej bezwymiarowej Yz_{kr} dla różnych wartości K, n, V . Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2, na którym przedstawiono również, celem porównania, wyniki obliczeń według rozwiązania analitycznego uproszczonego równania



Rys. 2. Wykresy uniwersalne $x_{kr}(Yz_{kr})$ według rozwiązania numerycznego dla $n=0,8, V=0,05$ w porównaniu z rozwiązaniami analitycznymi uproszczonymi (19), $n=1, V=0$

różniczkowego (18) dla $n=1$ i $V=0$. Dla tak przyjętych założeń otrzymuje się wprost zależność stopnia suchości w miejscu kryzysu wrzenia (gdy zanika film na ścianie kanału) od bezwymiarowej długości odcinka wrzenia Yz_{kr} , na którym zachodzi kryzys w postaci:

$$x_{kr} = \frac{0,99e^A - (0,98 - 0,01K)}{\frac{K}{A}(e^A - 1) + e^A} \cong \frac{1}{\frac{K}{A} + \frac{e^A}{e^A - 1}}, \quad (19)$$

gdzie

$$A = \frac{1+K}{2} Y_{z_{kr}}.$$

Dla dużych wartości parametru K zależność (19) przyjmuje prostszą postać

$$x_{kr} = \frac{1}{1 + \frac{2}{Y_{z_{kr}}}}, \quad (19a)$$

podobną do wyznaczonej eksperymentalnie przez Silvestriego [6]. Jak wynika z rysunku 2, rozwiązania analityczne (19) według uproszczonego równania różniczkowego (18) mają zbliżony charakter i przebieg, jak rozwiązania numeryczne pełnego równania (18). Dlatego też do dalszych analiz przyjęto uproszczony model liniowy opisany zależnością (19).

Parametr Y o wymiarze m^{-1} (jak wynika z przeprowadzonej analizy [14]) jest funkcją takich typowych wielkości wpływających na kryzys wrzenia, jak: masowa prędkość przepływu G , średnica kanału d_0 , lepkość czynnika (fazy gazowej) μ_G , objętość właściwa fazy gazowej v_G itp. Ponieważ analityczne określenie parametrów Y (dla konkretnych przypadków kryzysów wrzenia) oraz K (założenie (2)) jest trudne, postanowiono parametry te określić eksperymentalnie. W tym celu zbudowano w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN stanowisko doświadczalne do badań kryzysów wrzenia, na którym przeprowadzono eksperymenty z czynnikiem niskowrzącym, freonem-21, których wyniki przedstawiono w dalszej części pracy.

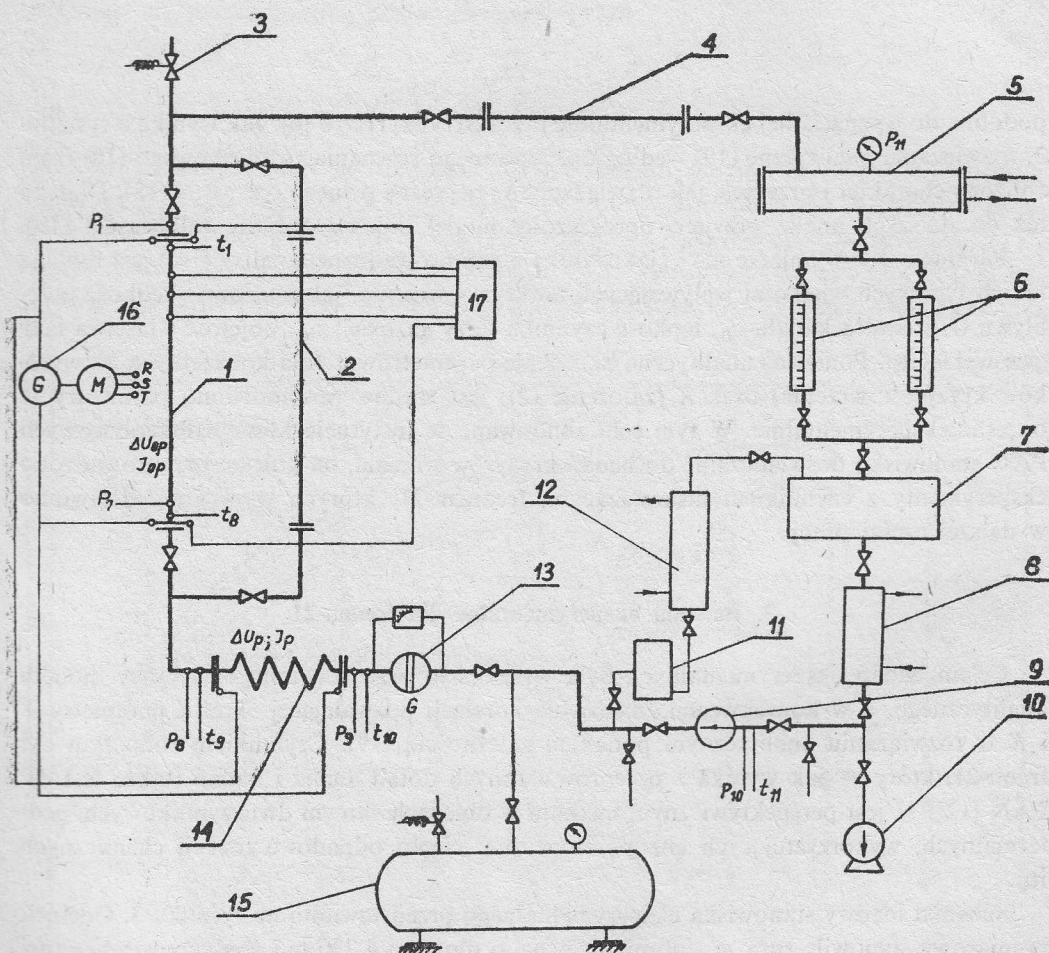
3. Badania eksperymentalne dla freonu-21

Celem badań eksperymentalnych była weryfikacja przedstawionego w pracy modelu analitycznego, a w konsekwencji znalezienie korelacji pozwalającej określić parametry Y i K w rozwiązaniu analitycznym podanym zależnością (19). Czynnikiem roboczym był freon-21, który – jak wynika z przeprowadzonych dotąd analiz i badań (także w IMP PAN [12]) – jest perspektywnym medium w obiegach siłowni dwuczynnikaowych, geotermalnych, wykorzystujących energię słoneczną, ciepło odpadowe reakcji chemicznych itp.

Schemat ideowy stanowiska eksperymentalnego przedstawiono na rysunku 3. Odcinek pomiarowy stanowiła rura ze stali nierdzewnej o długości 4,220 m i średnicy wewnętrznej 0,008 m. Kryzys wrzenia, objawiający się w eksperymentach skokiem temperatury ścianki, występował w górnym odcinku rury pomiarowej. Rejestrowano go w sposób ciągły za pomocą kilku termopar. Ponadto rejestrowano inne parametry: temperatury, ciśnienia oraz moce dostarczane do odcinka pomiarowego i podgrzewacza. Z chwilą wystąpienia kryzysu wrzenia pojawiały się stopniowo wzrastające pulsacje ciśnienia i zaczęło spadać natężenie przepływu czynnika roboczego. Przy wzroście temperatury ścianki odcinka pomiarowego w miejscu wystąpienia kryzysu powyżej założonej wartości (przyjmowano $150 \div 250^\circ\text{C}$), specjalny detektor kryzysu (rys. 3) wyłączał prąd grzejny.

Badania eksperymentalne prowadzono dla trzech zakresów ciśnień: 5,5, 10,6 i $15,0 \cdot 10^5$ Pa oraz trzech wytypowanych gęstości strumienia masy: 1000, 1750 i $3500 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Na rysunku 4 podano przykładowo ustalone eksperymentalnie zależności krytycznego stopnia suchości x_{kr} od długości odcinka wrzenia, na którym zachodzi kryzys z_{kr} . Długość odcinka, na którym zachodzi kryzys obliczano z bilansu cieplnego oraz przyjmując założenie, że początek przepływu pierścieniowego zachodzi przy $x_0=0,01$.



Rys. 3. Schemat stanowiska eksperymentalnego do badań kryzysów wrzenia

1 - odcinek pomiarowy pionowy, 2 - obejście, 3 - zawór bezpieczeństwa, 4 - odcinek pomiarowy poziomy, 5 - skraplacz, 6 - naczynia pomiarowe kondensatu, 7 - zbiornik wyrównawczy, 8 - chłodnica, 9 - pompa obiegowa, 10 - pompa próżniowa, 11 - filtr, 12 - chłodnica na obejściu, 13 - zwężka pomiarowa wydatku, 14 - podgrzewacz, 15 - zbiornik główny, 16 - bateria czterech spawarek (źródło prądu stałego), 17 - detektor kryzysu, $p_1 \div p_{11}$ - pomiar ciśnień, $t_1 \div t_8$ - pomiar temperatur ścianki odcinka eksperymentalnego, $t_9 \div t_{11}$ pomiar temperatur czynnika roboczego, G - pomiar gęstości strumienia czynnika roboczego, ΔU_{op} , I_{op} - pomiar spadku napięcia i prądu na odcinku eksperymentalnym, ΔU_p , I_p - pomiar spadku napięcia i prądu na podgrzewaczu

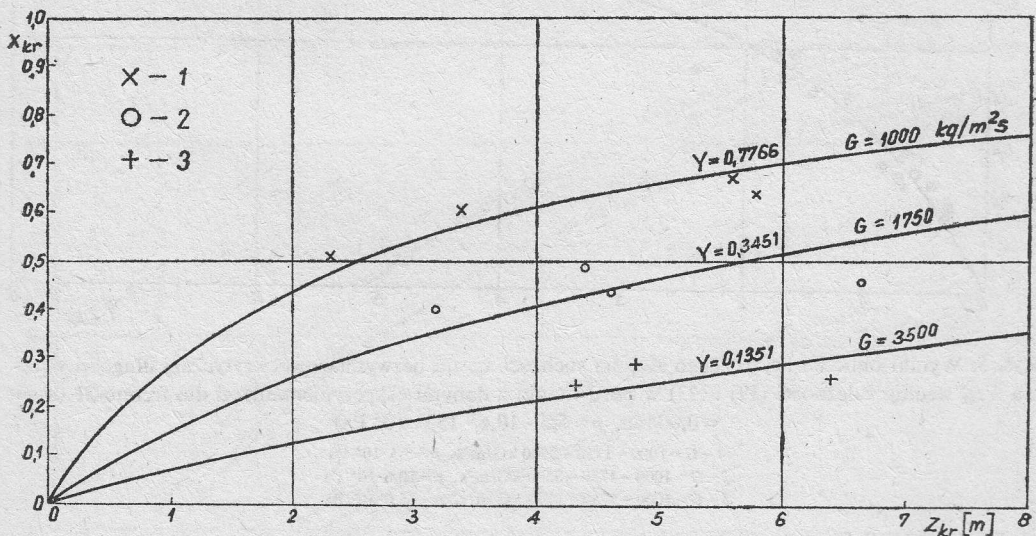
Dla ilustracji wyników badań poprowadzono poprzez punkty pomiarowe krzywe analityczne, obliczone według przyjętego modelu (19). Krzywe te dopasowano do punktów eksperymentalnych zgodnie z zasadą minimum kwadratów średnich odchylek.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych, opierając się na zależności (19), otrzymano wartości parametrów K i Y . Stwierdzono, że wartość parametru K dla freonu-21 w zakresie przeprowadzonych badań zmienia się w granicach $16 \div 26$ i może być przyjęta jako stała i równa 20. Przyjęcie takiej wartości K wpływa w nieznaczny tylko sposób na charakter krzywej analitycznej (19), a znakomicie upraszcza dalsze rozważania.

Jak już stwierdzono, parametr Y jest funkcją

$$Y = Y(G, p, d_0, \dots). \quad (20)$$

Poza tym na Y mogą wpływać inne własności fizyczne nie ujęte w zależności (20), a mające wpływ na odrywanie się kropeł cieczy lub ich separowanie się. Do takich parametrów należy np. napięcie powierzchniowe σ . Analiza wymiarowa parametru Y pozwala na przedstawienie go w postaci bezwymiarowej (Yd_0), w zależności od znanych dla prze-



Rys. 4. Badania eksperymentalne kryzysów wrzenia freonu-21 ($p_0 = 10,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $d_0 = 0,008 \text{ m}$)

1 - $G = 1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 2 - $G = 1750 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 3 - $G = 3500 \text{ kg/m}^2\text{s}$

plywu dwufazowego liczb. Jako propozycję można przyjąć przedstawienie (Yd_0) w zależności od bezwymiarowych liczb, np. w postaci

$$Yd_0 = A \left(\frac{Gd_0}{\mu_G} \right)^b \left(\frac{\rho_L \sigma d_0}{\mu_G^2} \right)^{b_1} f \left(\frac{p}{p_{kr}} \right). \quad (21)$$

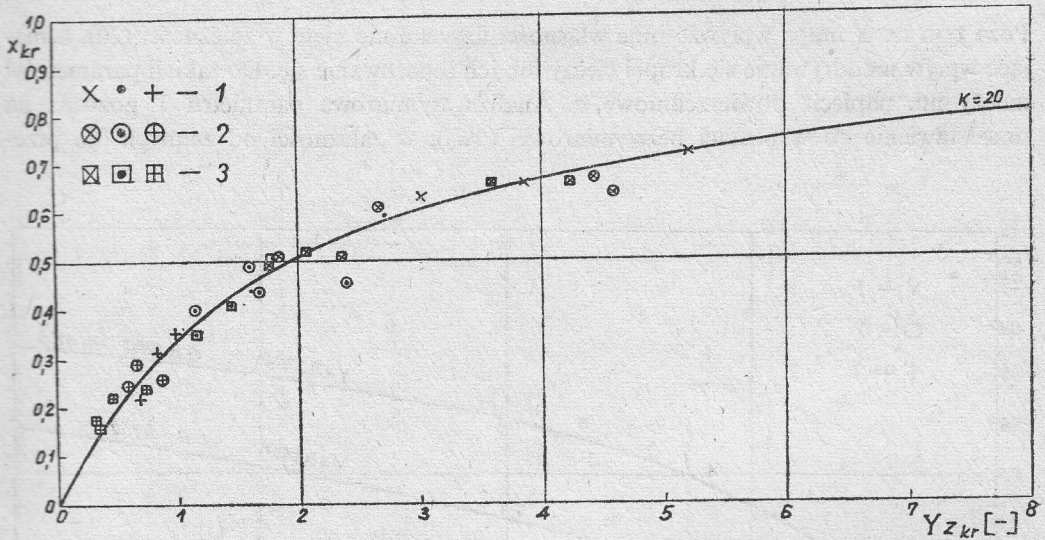
Występujące w zależności (21) stałe A , b , b_1 oraz postać funkcji $f(p/p_{kr})$ zostały ustalone na podstawie badań eksperymentalnych dla freonu-21. Oznaczając człon

$$A \left(\frac{\rho_L \sigma d_0}{\mu_G^2} \right)^{b_1} = A_1 \cong \text{const}, \quad (22)$$

znaleziono korelację pozwalającą dla freonu-21 określić parametr Y jako

$$(Yd_0)_{F-21} = 1,27 \cdot 10^6 \left(\frac{Gd_0}{\mu_G} \right)^{-1,40} \left(1 - 1,8976 \frac{p}{p_{kr}} \right). \quad (23)$$

Podczas badań eksperymentalnych freonu-21 wielkościami zmiennymi były G i p , natomiast średnica kanału d_0 była stała. Zgodnie z korelacją (23) dokonano porównania



Rys. 5. Wyniki obliczeń krytycznego stopnia suchości x_{kr} od bezwymiarowej krytycznej długości wrzenia Yz_{kr} według zależności (19) i (23) w porównaniu z danymi eksperymentalnymi dla freonu-21 ($d_0 = 0,008$ m, $p = 5,5 - 10,6 - 15,0 \cdot 10^5$ Pa)

1 - $G = 1000 - 1750 - 3500$ kg/m²s, $p = 5,5 \cdot 10^5$ Pa

2 - $G = 1000 - 1750 - 3500$ kg/m²s, $p = 10,6 \cdot 10^5$ Pa

3 - $G = 1000 - 1750 - 3500$ kg/m²s, $p = 15,0 \cdot 10^5$ Pa

wyników obliczeń krytycznych stopni suchości x_{kr} według (19) z danymi eksperymentalnymi (rys. 5). W obszarze $\pm 10\%$ błędu mieści się 74% punktów pomiarowych, zaś w obszarze $\pm 25\%$ wszystkie punkty pomiarowe.

4. Porównanie wyników badań eksperymentalnych dla freonu-21 i freonu-12

Dla porównania rezultatów własnych badań eksperymentalnych przeprowadzono na podstawie badań Stevensa [6] podobne obliczenia dla freonu-12, należącego do tej samej grupy czynników termodynamicznie podobnych. Na podstawie uzyskanych wartości optymalnych parametrów K i Y obliczono według zależności (19) $x_{kr}(z_{kr})$ i przedstawiono przykładowo na rysunkach 6 i 7. Zgodność wyników obliczeń z rezultatami badań eksperymentalnych dla freonu-12 jest wyjątkowo duża, szczególnie dla niższych wartości prędkości masowych.

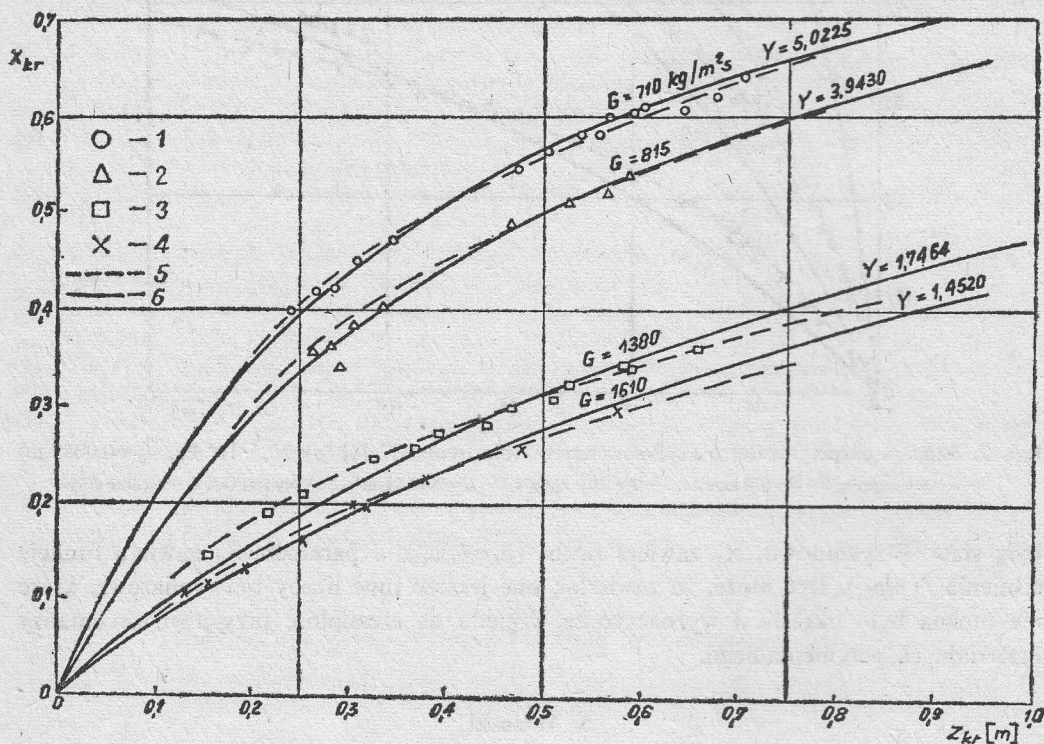
Wielkościami zmiennymi w badaniach eksperymentalnych nad freonem-12 były: gęstość strumienia masy G i średnica wewnętrzna kanału d_0 ($d_0 = 0,0053, 0,0085, 0,0161$ m). Ciśnienie p było stałe. Stąd do obliczeń przyjęto

$$Af\left(\frac{p}{p_{kr}}\right) = A_2 \cong \text{const.} \quad (24)$$

Otrzymano korelację na parametr Y w postaci

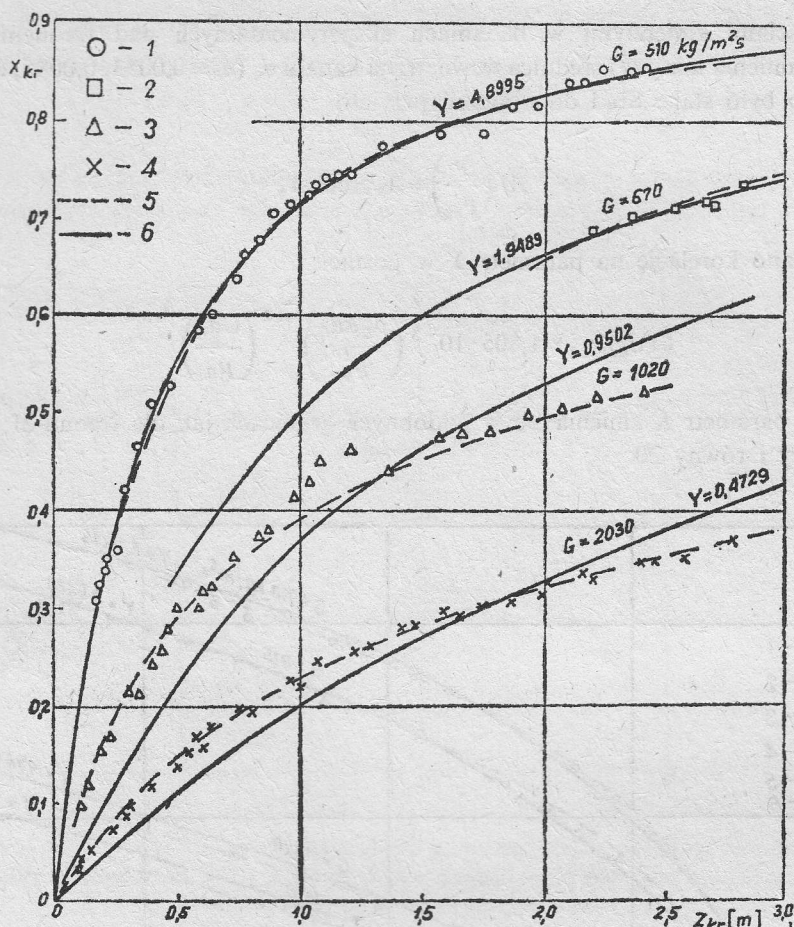
$$(Yd_0)_{F-12} = 1,805 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\rho_L \sigma d_0}{\mu_G^2}\right)^{1,17} \left(\frac{Gd_0}{\mu_G}\right)^{-1,60}, \quad (25)$$

przy czym parametr K zmienia się w podobnych granicach jak dla freonu-21; przyjęto, że jest stały i równy 20.



Rys. 6. Badania eksperymentalne kryzysów wrzenia dla freonu-12 [6] ($p = 10,6 \cdot 10^5$ Pa, $d_0 = 0,0053$ m)
 1 – $G = 710$ kg/m²s, 2 – $G = 815$ kg/m²s, 3 – $G = 1380$ kg/m²s, 4 – $G = 1610$ kg/m²s, 5 – według [6], 6 – według (19)

Jak wskazują przeprowadzone porównania wyników eksperymentalnych dla freonu-12 z wynikami obliczeń na podstawie zależności (19) i (25), [14], większość punktów leży w obszarze $\pm 15\%$. Należy zwrócić uwagę, że podane tutaj parametry A_1 i A_2 dla różnych freonów zawierają bezwymiarowe liczby, które w przeprowadzonych eksperymentach



Rys. 7. Badania eksperymentalne kryzysów wrzenia dla freonu-12 [6] ($p = 10,6 \cdot 10^5$ Pa, $d_0 = 0,0085$ m)
 1 – $G = 510$ kg/m²s, 2 – $G = 670$ kg/m²s, 3 – $G = 1020$ kg/m²s, 4 – $G = 2030$ kg/m²s, 5 – według [6], 6 – według (19)

były stałe. Przykładowo, A_1 zawiera liczbę $(\rho_L \sigma d_0 / \mu_G^2)$, a parametr A_2 zawiera funkcję ciśnienia $f(p/p_{kr})$. Być może, że zawierają one jeszcze inne liczby bezwymiarowe, które nie można było określić i wyznaczyć ze względu na szczupłość przyjętego do analizy materiału eksperymentalnego.

5. Wnioski

Jak się wydaje, opracowana metoda pozwala dość dokładnie przewidywać parametry kryzysu wrzenia w przepływie, jest stosunkowo prosta, opiera się na prostej zależności analitycznej. Ustalone korelacje na K i Y ((23) i (25)) są w chwili obecnej indywidualne dla poszczególnych czynników i stanowią ilustrację przyjętej metody.

Dalsze analizy teoretyczne jak i eksperymentalne pozwolą na precyzyjniejsze zidentyfikowanie i określenie parametrów K i Y . Być może doprowadzą one do zbudowania ogólnej zależności, słusznej dla wszystkich czynników.

Niniejszą pracę można traktować jako propozycję sposobu opracowania danych eksperymentalnych. Wyjaśnia ona również częściowo proces kryzysu wrzenia w przepływie oparty na fizycznym modelu tego zagadnienia.

Praca wpłynęła do Redakcji w marcu 1979 r.

Literatura

- [1] L. S. Tong, *Boiling Crisis and Critical Heat Flux*. U. S. Atomic Energy Commission, 1972.
- [2] L. S. Tong, *Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow*. John Wiley and Sons, INC, New York—London—Sydney 1965.
- [3] P. B. Whalley, P. Hutchinson, G. F. Hewitt, *The Calculation of Critical Heat Flux in Forced Convection Boiling*. Fifth Intern. Heat Transfer Conference, Japan, Sept. 3 - 7, 1974.
- [4] P. Hutchinson, G. F. Hewitt, *Deposition of Liquid or Solid Dispersions from Turbulent Gas Streams: a Stochastic Model*. Chemical Eng. Science, vol. 26, p. 419 - 439, 1971.
- [5] G. F. Hewitt, N. S. Hall-Taylor, *Annular - Two-Phase Flow*. Chemical Engineering Division, A. E. R. E., Harwell, England, Pergamon Press, 1970.
- [6] M. Cumo, C. Maciucă, M. Moronesi, G. Palazi, *A Burn-Out Correlation to Scale Water with Freon*. European Two-Phase Flow Group Meeting, Harwell, June, 1974.
- [7] W. E. Doroszczuk, *Kryzisy ciepłobmiennia pri kipienii wody w trubach*. Energiya, Moskwa 1970.
- [8] J. Madejski, B. Staniszewski, *Wymiana ciepła przy wrzeniu i przepływie dwufazowe*. Ośrodek informacji o Energii Jądrowej, Warszawa 1971.
- [9] J. Mikieliewicz, *Próba analizy teoretycznej kryzysów wrzenia w przepływie*. Prace IMP, z. 64, 1974.
- [10] J. Mikieliewicz, J. Moszyński, *Minimum Thickness of a Liquid Film Flowing Vertically Down a Solid Surface*. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 19, 1976.
- [11] B. Sedler, J. Mikieliewicz, *Uproszczony model analityczny kryzysów wrzenia w przepływie*. Prace IMP, z. 76, 1978.
- [12] B. Sedler, *Kryzisy wrzenia w przepływie czynników niskowrzących. Stanowisko eksperymentalne, koncepcja badań*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr 984, Gdańsk 1976.
- [13] H. Kućmierz, B. Sedler, *Detektor kryzysu - koncepcja, schemat stanowiska do badania kryzysów wrzenia w przepływie czynników niskowrzących*. Oprac. wewn. IMP PAN, nr 49, Gdańsk 1975.
- [14] B. Sedler, *Analiza kryzysów wrzenia w przepływie czynników niskowrzących na przykładzie freonu-21*. Praca doktorska, Gdańsk, luty, 1979.

Анализ кризисов кипения в течениях низкокипящих сред

Резюме

В работе представлена аналитическая модель явления кризиса кипения в кольцевом течении. Эта модель основана на анализе процесса высыхания пленки жидкости на стенке. Она позволяет сформулировать дифференциальные уравнения баланса массы жидкости в пленке и в ядре течения (1а, б).

Решение (19) выведенных уравнений выражается двумя параметрами K и Y , которые трудно определить теоретическим путем. Из-за того для их определения использован анализ экспериментальных данных. С этой целью проведены собственные экспериментальные исследования для фреона 21 и анализ экспериментальных данных для фреона 21 на основе результатов исследований других авторов [6]. Это позволило экспериментально определить вышеуказанные параметры ((23),

(24)). Кажется, что принятый метод позволяет довольно точно предвидывать параметры кризиса кипения в течении. Для фреона 21 в зоне $\pm 10\%$ ошибки помещается 74% измерительных точек, а в зоне $\pm 25\%$ — все экспериментальные точки. Для фреона 21 большинство экспериментальных точек помещается в диапазоне ошибки $\pm 15\%$.

Указанный метод относительно прост и основывается на простой аналитической зависимости (19). Экспериментально определенные корреляции на K и Y в этот момент являются индивидуальными для отдельных сред и представляют собой иллюстрацию припаятого метода.

Дальнейшие, как теоретические так и экспериментальные, анализы должны обеспечить более точную идентификацию и определение параметров K и Y . Быть может станет возможным определение общей зависимости правильной для всех сред.

Настоящую работу можно считать предложением способа обработки экспериментальных данных. Она также частично выясняет процесс кризиса кипения в течении на основе физической модели этого явления.

Analysis of Boiling Crises in a Flow of Low-Boiling Media

Summary

An analytical model of the effect of boiling crisis in an annular flow is presented in the paper. The model, based on an analysis of the process of drying of a liquid film on a wall, makes possible formulation of differential equations describing the balance of the liquid mass in the film and in the flow core (1a, b).

The solution (19) of the equations in question is given in terms of two parameters K and Y which could not be determined theoretically without difficulty. To this end an analysis of experimental data was therefore adopted. Independent experimental investigations were carried out for freon 21. Also experimental data given for freon 21 in Reference [6] were included in the analysis. This gave experimental values for the parameters under consideration ((23), (25)). It is believed that the method employed gives a fairly accurate prediction of the parameters of boiling crisis in a flow. For freon 21 74% of measurements lies within $\pm 10\%$ error region, while all of them fall into $\pm 25\%$ error region. Similar situation occurs for freon 12 where a majority of experimental points corresponds to $\pm 15\%$ error region.

The method described in the article is relatively simple, based on the simple analytical relation, (19). Correlations determined experimentally for K and Y are at present different for different media and serve the purpose of illustrating the method.

Further theoretical analyses and experimental investigations will allow for more precise identification and determination of the parameters K and Y , and might lead to a general formula satisfied for all media.

The present work can be regarded as a proposition of a method of experimental data processing. It also explains partly the process of boiling crisis in flow on the basis of the physical model of this phenomenon.