

POLSKA AKADEMIA NAUK

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF
FLUID-FLOW MACHINERY

PRACE

INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

99



GDAŃSK 1995

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 machines

Wydanie publikacji dofinansowane zostało przez PAN ze środków DOT uzyskanych z Komitetu Badań Naukowych

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH * HENRYK JARZYNA * JERZY KRZYŻANOWSKI
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ * WŁODZIMIERZ J. PROSNAK
JÓZEF ŚMIGIELSKI * ZENON ZAKRZEWSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EDITORIAL COMMITTEE

EUSTACHY S. BURKA (REDAKTOR NACZELNY – EDITOR-IN-CHIEF)
JAROSŁAW MIKIELEWICZ
EDWARD ŚLIWICKI (REDAKTOR – EXECUTIVE EDITOR) * ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. poczt. 621,
☎ (0-58) 46-08-81 wew. 141, fax: (0-58) 41-61-44,
e-mail: tjan@imppan.imp.pg.gda.pl

ISBN 83-01-95102-2
ISSN 0079-3205

MICHAŁ K. BEZRODNY¹, JÓZEF GOŚCIK¹, EUGENIUSZ KONDRUSIK¹

Kryzys przepływu przeciwaprądowego cieczy i pary w kanale poziomym²

W pracy przedstawiono wyniki doświadczalnych badań przepływu cieczy i pary w przypadku przeciwaprądowego ustroju rozwarstwowanego, które dotyczą niestabilności przepływu, określonej mianem zalewania. Stwierdzono występowanie dwu charakterystycznych prędkości cieczy odpowiadających początkowi procesu i odwróceniu kierunku przepływu.

Oznaczenia

$$K = W''_{kr} \sqrt{\rho'' / \sqrt[4]{\sigma g (\rho' - \rho'')}} \quad - \quad \text{kryterium stabilności,}$$

$$K_p = p / \sqrt{\sigma g (\rho' - \rho'')} \quad - \quad \text{kryterium ciśnienia,}$$

W	-	prędkość przepływu [m/s],	p	-	ciśnienie układu dwufazowego
W_o	-	prędkość cieczy zredukowana w odniesieniu do przekroju poprzecznego kanału [m/s]	σ	-	pośredniego nośnika ciepła [Pa],
$W_{o.pocz}$	-	początkowa maksymalna wielkość zredukowanej prędkości cieczy [m/s],	ρ	-	napięcie powierzchniowe [N/m],
			g	-	gęstość [kg/m ³],
					przyspieszenie sił ciężkości [m/s ²].

Indeksy

$''$	-	parametr dotyczy fazy ciekowej lub parowej systemu dwufazowego, znajdującego się w stanie nasycenia,	abs	-	absolutny,
tr	-	krytyczny,	c	-	ciecz,
			p	-	powietrze,
			$pocz$	-	początkowe.

1. Wprowadzenie

Stabilność różnego rodzaju przepływów dwufazowych jest jednym z podstawowych problemów hydrodynamiki, który badany jest głównie doświadczalnie. Należy zaznaczyć, że dostatecznie rozpoznane są przepływy dwufazowe cieczy i

¹Politechnika Białostocka, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, 15-351 Białystok, Wiejska 45c

²Pracę wykonano w ramach grantu KBN 8T10B01709

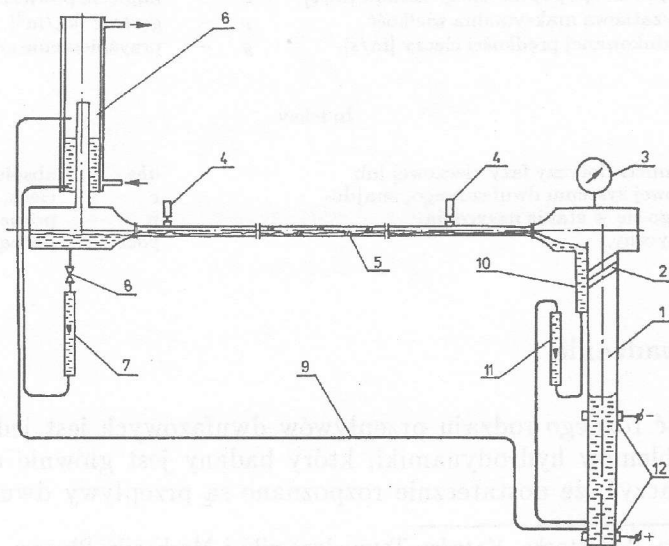
pary w kanałach poziomych, w przypadku współprądowego ustroju rozwarstwionego.

Procesom naruszania stabilności przepływu towarzyszą wyraźne zjawiska kryzysowe również w przepływach przeciwprądowych, ale są one analizowane w literaturze tylko w odniesieniu do kanałów usytuowanych pionowo [1-6]. W związku z tym uzasadnione są teoretyczne i eksperymentalne badania stabilności przeciwprądowego przepływu dwufazowego w kanałach poziomych, który realizuje się np. w urządzeniach pracujących na zasadzie termosyfonów dwufazowych. Współcześnie dostępne są wyniki szczegółowych badań procesów wymiany ciepła w zamkniętych termosyfonach poziomych [7,8] – które zachodzą w warunkach sprzężenia przepływu cieczy i pary – na odcinkach: parowania, transportu, kondensacji. Pozostaje więc praktycznie nie poznany istotny przypadek naruszenia stabilności ruchu przeciwprądowego ciecz-para w kanale poziomym, w warunkach niezależnej zmiany natężenia przepływu faz.

Przedmiotem niniejszej pracy jest eksperymentalna identyfikacja kryzysu przepływu fazy ciekowej wywołanego naruszeniem stabilności przeciwprądu w kanale poziomym, przy odpowiedniej regulacji natężenia przepływu.

2. Środki i metodyka badań

Część eksperymentalna stanowiska badawczego (rys. 1) wykonana została w postaci poziomo usytuowanego stalowego elementu rurowego o średnicy wewnętrznej $d = 28$ mm. W celu wizualizacji przepływu – w części środkowej kanału –



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

umiejscowiono szklaną wstawkę – 5. Końce elementu poziomego połączono, poprzez zsynchronizowane kolektory tłumiące, z komorami o kształcie rurowym, gdzie następuje generacja pary (1) i kondensacja (6). Na początku i końcu kanału roboczego ustawiono przyrządy wskaźnikowe 4 do pomiaru wysokości strugi cieczy. W celu wytworzenia pary, dolny koniec rury (12) nagrzewano oporowo przez doprowadzenie prądu ze źródła o regulowanym niskim napięciu. Ciepło było odprowadzane przez wodę bieżącą, cyrkulującą w przestrzeni międzyrurowej układu kondensacyjnego 6. Regulacji, doprowadzenia i kontroli ilości skondensowanej fazy parowej ściekającej po rurze kondensatora, połączonej z przestrzenią wejściową fazy cieczonej kolektora, dokonywano rotametrem 7 z zaworem regulacyjnym 8. Zużycie nośnika ciepła, w postaci ciekłej, odprowadzanego od części roboczej, kontroluje się rotametrem 11 zamontowanym na odcinku łączącym zbiorniczek 10 z dolnym końcem komory 1, w której wytwarzano parę. W celu uniknięcia niekontrolowanych strat fazy cieczonej nośnika ciepła, na wyjściu ze strefy generacji pary, zamontowano separator kropli 2. Do odprowadzenia nadwyżki cieczy powstającej w kondensatorze, stanowisko zaopatrzone w rurkę przelewową 9, łączącą komorę zbiorczą kondensatora z dolną częścią generatora pary.

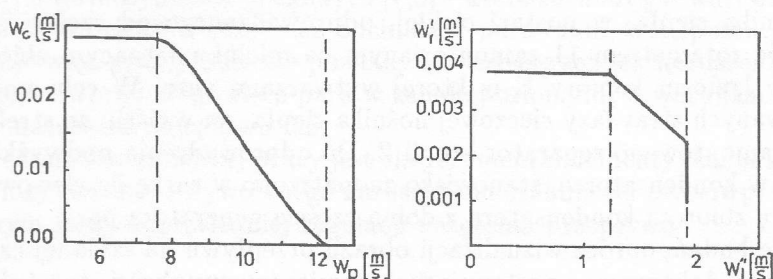
W trakcie badań, oprócz wizualizacji obrazu przepływu na szklanej części kanału roboczego, dokonywano następujących pomiarów: wysokości strugi cieczy na końcach kanału roboczego, ciśnienia w fazie parowej pośredniego nośnika ciepła, natężenia przepływu fazy cieczonej nośnika ciepła doprowadzanego i odprowadzanego z części roboczej. Mierzono również doprowadzaną moc elektryczną i bieżącą moc cieplną odprowadzaną w kondensatorze.

Zestawienie bilansu doprowadzanej i odprowadzanej mocy do stanowiska pozwoliło ustalać straty do otoczenia i upewniać się o nieobecności przecieków w układzie. Jako pośredni nośnik ciepła (ciecz roboczą) wykorzystano freon-113.

Pomiary przeprowadzono w stanie równowagi cieplnej i hydrodynamicznej układu dwufazowego, w następującej kolejności. Przy minimalnej mocy przekazywanej do stanowiska, a więc przy minimalnych prędkościach wzajemnego oddziaływania międzyfazowego na odcinku roboczym (adiabatycznym), ustalano i trzymywano, za pomocą zaworu 8, natężenie przepływu fazy cieczonej pośredniego nośnika ciepła doprowadzanego do strefy roboczej. Następnie stopniowo zwiększano moc doprowadzaną, aż do osiągnięcia stanu ustalonego. Po każdym zwiększeniu mocy, a zatem i prędkości fazy parowej, rotametry wykazywały (porównując od niektórych wielkości) różnicę natężenia przepływu fazy cieczonej na wejściu i wyjściu ze strefy roboczej. Różnica ta wzrastała wraz ze zwiększeniem prędkości fazy parowej. Stopniowe zmniejszanie natężenia przepływu cieczy kończyło się zahamowaniem, a następnie odwróceniem kierunku przepływu cieczy, co dawało współprąd zamiast przeciwpłądu i kończyło się nieuniknionym wyschnięciem kanału. Proces ten nosił jasny wyrazisty charakter kryzysowy i przebiegał w krótkim okresie czasu.

3. Wyniki badań i ich analiza

Przeprowadzone badania, których celem było wyjaśnienie mechanizmu procesu zalewania przepływu i porównanie go z odpowiednimi zjawiskami w kanale pionowym wykazały, że istnieje istotna różnica w obrazie wzajemnego oddziaływania faz w kanałach usytuowanych poziomo i pionowo. Na rys. 2 przedstawiono typowe kształty krzywych zalewania przepływu dla kanału pionowego (rys. 2a) [6] i własne wyniki dla kanału poziomego (rys. 2b).



Rys. 2. Wykresy dotyczące procesu zalewania przepływu: a) w kanale pionowym (dane dla przepływu wodno-powietrznego przy ciśnieniu atmosferycznym [6]); b) w kanale poziomym (ilustracja własnych wyników eksperymentalnych, doświadczenia z freonem-113 przy $p_{abs} = 1.064 \cdot 10^5$ Pa).

Z rys. 2a widać, że proces zalewania w kanale pionowym rozwija się monotonicznie, poczynając od pewnego początkowego natężenia przepływu fazy ciekowej do zera, tzn. do całkowitego zaniku zstępującego przepływu cieczy.

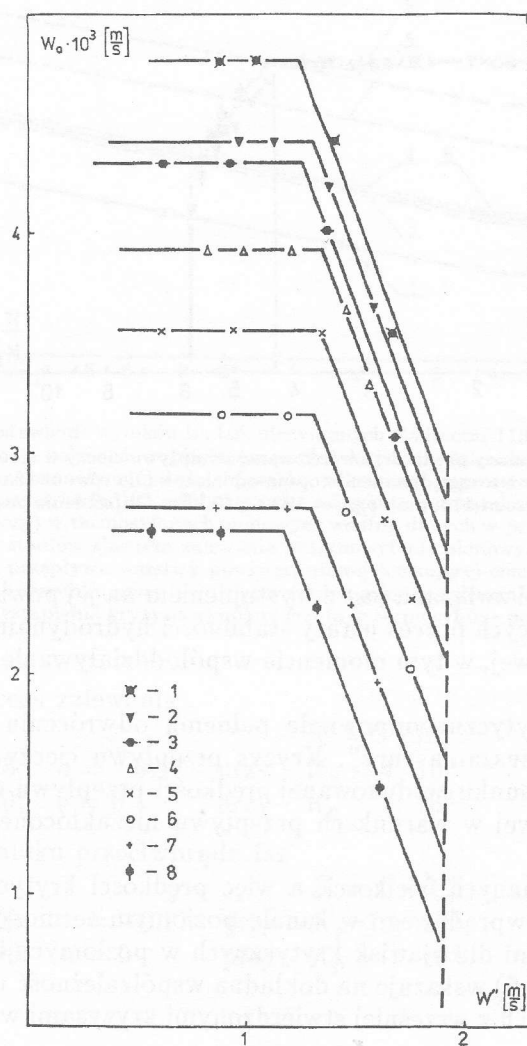
Proces wzajemnego oddziaływania faz w kanale poziomym (rys. 2b) jest obserwowany w węższym przedziale natężenia przepływu cieczy. Trwa on od stanu wyjściowego do pewnej wielkości pośredniej prędkości pary, przy której następuje gwałtowne odwrócenie kierunku przepływu całej pozostałej fazy ciekowej.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań zalewania przepływu w kanale poziomym przy różnych początkowych wielkościach natężenia przepływu. Widać, że tak początek procesu wzajemnego oddziaływania faz, jak i całkowite przerwanie przeciwpływu faz nie zależy od początkowego natężenia przepływu cieczy. Opisane wyżej zjawiska zależą natomiast od pewnych prędkości krytycznych fazy parowej. Wielkości krytyczne fazy parowej zależą z kolei od rodzaju cieczy i stanu termodynamicznego ośrodka roboczego.

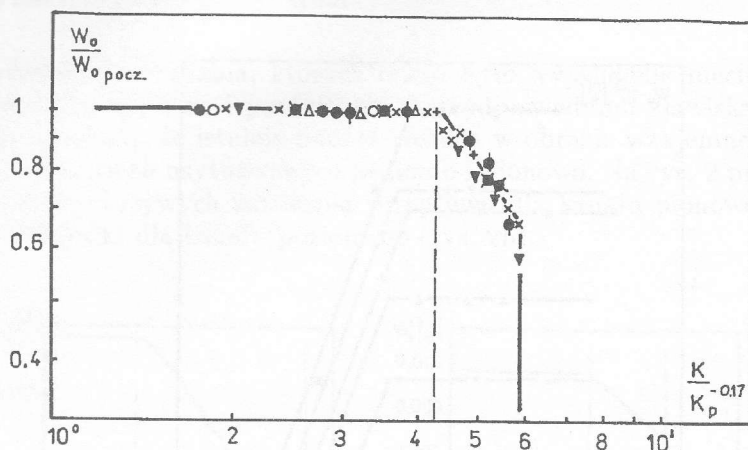
Bezwymiarowe przedstawienie danych eksperymentalnych otrzymanych w poszerzonym zakresie termofizycznych charakterystyk przepływu (patrz rys. 4) potwierdza istnienie dwóch charakterystycznych prędkości krytycznych oddziaływania międzyfazowego.

Prędkości te odpowiadają warunkom granicznym początku procesu hamowania i całkowitego odwrócenia kierunku przepływu fazy ciekowej w strudze, co powoduje wyschnięcie kanału.

Pierwsza prędkość krytyczna pary odpowiada początkowi hamowania warstwy



Rys. 3. Zależność odnoszącej się do całego przekroju prędkości cieczy od średniej rzeczywistej prędkości pary, w warunkach przeciwprądowego współdziałania faz, w roboczej przestrzeni poziomej stanowiska badawczego. Nośnik ciepła: freon-113, przy $p_{abs} = 1.064 \cdot 10^5$ Pa. 1 - $W_{0.pocz} = 4.78 \cdot 10^{-3}$ m/s; 2 - $4.4 \cdot 10^{-3}$; 3 - $4.3 \cdot 10^{-3}$; 4 - $3.9 \cdot 10^{-3}$; 5 - $3.55 \cdot 10^{-3}$; 6 - $3.16 \cdot 10^{-3}$; 7 - $2.75 \cdot 10^{-3}$; 8 - $2.64 \cdot 10^{-3}$.



Rys. 4. Zależność względnej zmiany prędkości zredukowanej przepływu cieczy w strudze od bezwymiarowej prędkości strumienia pary z uwzględnieniem stopnia oddziaływania równoważnego ciśnienia układu dwufazowego. Nośnik ciepła: freon-113, przy $p_{abs} = 100 \div 240$ kPa. Objaśnienie punktów patrz rys. 3.

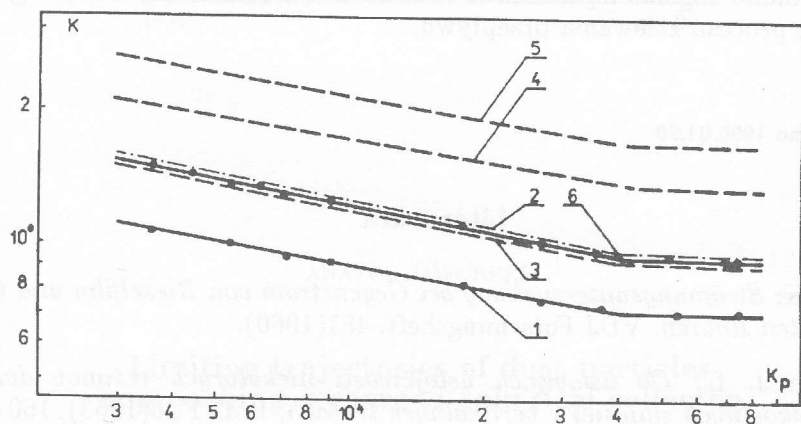
powierzchniowej cieczy i związana jest z wystąpieniem na jej powierzchni fal kapilarnych charakteryzujących proces utraty stabilności hydrodynamicznej poprzedniej struktury dwufazowej, w tym momencie współoddziaływanie faz praktycznie nie występuje.

Druga prędkość krytyczna odpowiada pełnemu odwróceniu kierunku przepływu cieczy, czyli „osuszania rury”. Kryzys przepływu cieczy w rurze poziomej następuje przy stosunku zredukowanej prędkości przepływu cieczy w strudze do wielkości początkowej w warunkach przepływu niezakłóconego wynoszącym $(0.65 \div 0.7)$.

Porównanie otrzymanych wielkości, a więc prędkości krytycznych dwufazowego przepływu przeciwprądowego w kanale poziomym termosyfonów zamkniętych ze znanymi danymi dla zjawisk krytycznych w poziomych i pionowych termosyfonach (patrz rys. 5) wskazuje na dokładną współzależność ujawnionych zjawisk hydrodynamicznych z wcześniej stwierdzonymi kryzysami wymiany ciepła w termosyfonach.

Jak widać z rys. 5, pełne odwrócenie kierunku przepływu cieczy w strudze odpowiada dokładnie zjawisku początku zrywania kropel z powierzchni filmu w układzie przeciwprądowym [9] i jest przyczyną kryzysu przenoszenia ciepła w termosyfonach poziomych [8]. Zjawiska hydrodynamicznej niestabilności dwufazowego przepływu przeciwprądowego ujawnione w niniejszej pracy jako zjawiska początku hamowania przepływu cieczy w strudze były notowane w badaniach termosyfonów klasycznej konstrukcji i odzwierciedlone są w załamaniu krzywej zależności wysokości strugi cieczy od obciążenia cieplnego [7].

Przeprowadzone badania i uogólnienie danych doświadczalnych pozwoliły ustalić następujące zależności do obliczania:



Rys. 5. Uogólnione zestawienie wyników badań, otrzymanych dla freonu-113 w zakresie ciśnień roboczych $p_{abs} = 100 \div 240$ kPa; 1 – zależność uogólniająca początek procesu zalewania w rurze poziomej (dane niniejszych badań); 2 – zależność uogólniająca zjawisko całkowitego zaprzestania przeciwprądu faz w rurze poziomej (dane niniejszych badań); 3 – dolna granica zalewania (początek zrywania kropel z powierzchni ściekającego filmu cieczy) w termosyfonach pionowych według danych w pracy [9]; 4, 5 – charakterystyki poziomów rozwijania stadiów zjawiska zalewania w termosyfonie pionowym [9]; 4 – początek zjawiska odwrócenia kierunku przepływu warstwy powierzchniowej ściekającej cieczy (zwisanie filmu cieczy); 5 – zjawiska odwrócenia kierunku przepływu cieczy (dolna granica zalewania); 6 – zalecana zależność do obliczeń warunków wystąpienia kryzysu wymiany ciepła w termosyfonie poziomym [8].

a) początku procesu zalewania

$$K = C \cdot K_p^n$$

gdzie $C = 4.25$; $n = -0.17$ przy $K_p \leq 4 \cdot 10^4$
 $C = 7.20$; $n = 0$ przy $K_p > 4 \cdot 10^4$

b) całkowitego zaniku przeciwprądu faz

$$K = C \cdot K_p^n$$

gdzie: $C = 6.00$; $n = -0.17$ przy $K_p \leq 4 \cdot 10^4$
 $C = 1.00$; $n = 0$ przy $K_p > 4 \cdot 10^4$

4. Wnioski

1. W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że proces zalewania występujący przy przeciwprądzie cieczy i pary w kanałach poziomych trwa od początku hamowania przepływu cieczy w strudze do chwili odwrócenia kierunku przepływu cieczy, co daje współprąd zamiast przeciwprądu i kończy się nieuniknionym wyschnięciem kanału.
2. Wykazano, że zjawiska kryzysowe początku i końca warunków procesu zalewania określone są tylko krytycznymi wielkościami prędkości fazy parowej zależnymi od ciśnienia ośrodka roboczego i rodzaju cieczy.

3. Otrzymano uogólnioną zależność obliczeniową do obliczeń dolnych i górnych granic procesu zalewania przepływu.

Pracę zgłoszono 1995.04.29

Literatura

- [1] Feind K: *Strömungsuntersuchung bei Gegenstrom von Rieselfilm und Gas in lotrechten Röhren*, VDJ Forschungsheft, 481(1960).
- [2] Sorokin J. L.: *Ob uslovijach ustojčivosti niekotorych režimov dviženija gazožidkostnych smiesiej v vertikalnych trubach*, PMTF, 6(1963), 160÷165.
- [3] Sorokin J. L., Kirdiaškin A. G., Pokusajev B. G.: *Issledovanije ustojčivosti plenočnogo režima tečenija židkosti v vertikalnoj trubie pri voschodiaščem dviženii gaza*, Chimičeskoje i neftianoje mašinostrojenije, 5(1965), 35÷38.
- [4] Puškina O. P., Sorokin J. L.: *Oprykidyvanije dviženija plenki židkosti v vertikalnych trubach*, Trudy CKTI, 96(1969), 34÷39.
- [5] Uollis, Makinczeri: *Javlenije visiaščej plenki židkosti v vertikalnom kolcevom tiečenii*, Trudy amerikanskogo obščestva inžinerov-mechanikov (tłum. rosyjskie), seria D, 3(1974), 218÷219.
- [6] Celata G. P., Cumo M., Setaro T. A.: *Data set of flooding in circular tubes*, Experimental Thermal and Fluid Sciences, 5(1992), no.4, 437÷447.
- [7] Bezrodnyj M. K., Volkov S. S., Podhoreckij W. M.: *Gidrodinamičeskie charakteristiki režima zachlobyvanija dvuchfaznogo tiečenija v uslovijach horizontalnogo termosifona*, Izv. Vuzov, ser. Energetika, 1988, no. 2, 100÷103.
- [8] Bezrodnyj M. K., Podhoreckij W. M.: *Predelnyj teploperenos v horizontalnom dvuchfaznom termosifonie*, IFZ, (58)1990, no. 1, 63÷67.
- [9] Bezrodnyj M. K., Volkov S. S.: *Study of hydrodynamic characteristics of two-phase flow in closed thermosiphons*, Advances in Heat Pipe Technology, Proc. of 4th International Heat Pipe Conference, London, Pergamonn Press, 1981.

Burnout of counter-current two-phase flow in a horizontal channel

Summary

In the paper some representative results of experimental investigations concerned with the flooding process of counter-current liquid-vapour two-phase flow in a horizontal channel are presented. The existence of two characteristic interphase boundary velocities that correspond to initial conditions of the process and full inversion of the liquid phase in the flow is found.