

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

61

WARSZAWA—POZNAN 1973

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 uwzględ-
nieniem 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
JÓZEF ŚMIGIELSKI · ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 80-952 Gdańsk
ul. Gen. J. Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 410+90 egz.	Oddano do składania 22 VIII 1972 r.
Ark. wyd. 9,0. Ark. druk. 7,5	Podpisano do druku 14 III 1973 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 62 g	Druk ukończono w marcu 1973 r.
Nr zam. 554/128	D-4/155. Cena zł 27,-

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

JANUSZ KOWALSKI, JAROSŁAW MIKIELEWICZ, EDWARD ŚLIWICKI

Gdańsk

Zmiany ciśnienia wywołane gwałtownym zwężeniem przepływu jednofazowego oraz dwufazowego w warunkach braku równowagi termodynamicznej

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych spadków ciśnień przy gwałtownym zwężeniu przekroju kanału dla przepływu jednofazowego oraz przepływu dwufazowego w warunkach braku równowagi termodynamicznej freonu-21. Wyniki badań przepływu jednofazowego porównano z zależnościami Weisbacha, otrzymując dużą zgodność. Dla przepływu dwufazowego przedstawiono własną metodę opracowania eksperymentu. Otrzymano zadowalające korelowanie się wyników.

Spis oznaczeń i symboli

A — przekrój poprzeczny,
 d — średnica,
 g — przyspieszenie,
 Δh — różnica poziomów,
 k — współczynnik strat ciśnienia,
 l — długość odcinka pomiarowego,
 p — ciśnienie,
 Δp — różnica ciśnień,
 t — temperatura,
 Δt — różnica temperatur,
 w — prędkość,
 x — stopień suchości,
 γ — ciężar właściwy,
 ρ — gęstość,
 σ — stosunek przekrojów kanału,
 ζ — współczynnik tarcia,
 φ — lokalna zawartość pary w przekroju poprzecznym kanału.

Indeksy dotyczą

c — cieczy,
 F — freonu,
 Hg — rtęci,
 h — hydrostatycznego,
 n — nasycenia,
 p — pary, przekroju poprzecznego,
 0 — przepływu jednofazowego, wlotu,
 sw — ścianki wewnętrznej,
 x — przepływu dwufazowego,
 t — tarcia,
 w — wewnętrznej,
 z — zwężenia,
— — mieszaniny para — ciecz,
 $0, 1, 2$ — odpowiednich przekrojów kanału.

1. Wprowadzenie

Zagadnienie spadku ciśnienia przy gwałtownym zwężeniu przepływu jest ważne we wszelkich obiegach, szczególnie z cyrkulacją naturalną. Występuje ono także w obiegu z odparowaniem czynnika niskowrzącego w siłowni dwuczynnikowej. Nad tym obiegiem

prorowadzone są badania w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN. Jednym z problemów jest zagadnienie strat ciśnienia. W niniejszej pracy rozpatrywano gwałtowne zwężenie przekroju przepływu, które występuje na wlocie do generatora odparowującego czynnik. Jak wynika z analizy tego zagadnienia na wlocie do generatora pary siłowni dwuczynnikowej może wystąpić: jednofazowy przepływ cieczy, przepływ mieszaniny dwufazowej w stanie przechłodzenia (braku równowagi termodynamicznej) lub w stanie równowagi termodynamicznej.

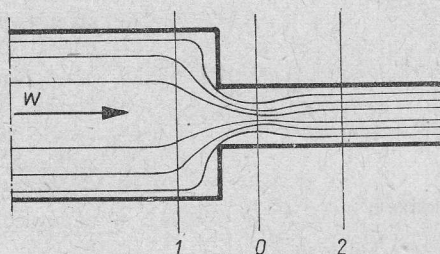
Zagadnienie przepływu jednofazowego cieczy przy gwałtownym zwężeniu kanału zostało dobrze zbadane. Istnieje szereg prac teoretycznych i eksperymentalnych [1, 2, 3, 4], nie spotkano jednak prac eksperymentalnych dotyczących przepływu freonu 21. Natomiast zagadnienie przepływu mieszaniny dwufazowej przy gwałtownym zwężeniu kanału, w stanie braku równowagi termodynamicznej jest zagadnieniem nowym. Istnieją wprawdzie prace dotyczące przepływu mieszaniny w stanie braku równowagi termodynamicznej, ale dotyczą one kanału o stałym przekroju [5, 6].

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie eksperymentalnych badań spadków ciśnień przy zwężeniu kanału, dla przepływu jednofazowego i przekroju dwufazowego w stanie braku równowagi termodynamicznej dla perspektywicznego — dla siłowni dwuczynnikowej — czynnika R-21, przy parametrach odpowiadających generacji pary w obiegu binarnym.

2. Zmiana ciśnienia przy gwałtownym zwężeniu przekroju przepływu

2.1. Przepływ jednofazowy

Zagadnienie zmian ciśnienia statycznego cieczy, która przepływa poprzez gwałtowne zwężenia, stanowi przedmiot wielu prac. Weisbach [1] opierał się na fakcie, że rzeczywisty przekrój przepływu po zwężeniu F_1 jest mniejszy od przekroju kanału F_0 (rys. 1).



Rys. 1

Zakładał, że straty na zwężenie między przekrojami 1–0 są pomijalnie małe i całkowite straty można traktować jako straty na rozprężenie 0–2.

Bilans ciśnienia między przekrojami 1–0 można wtedy zapisać

$$p_1 + \frac{\rho_c w_1^2}{2} = p_0 + \frac{\rho_c w_0^2}{2}. \quad (1)$$

Pomiędzy przekrojami 0–2 (gdzie występuje strata na rozprężenie) bilans przedstawia się następująco:

$$p_0 + \frac{\rho_c w_0^2}{2} = p_2 + \frac{\rho_c w_2^2}{2} + k_0 \frac{\rho_c w_2^2}{2}. \quad (2)$$

Porównując równania (1) i (2) otrzymujemy zależność

$$\Delta p_{0z} = p_2 - p_1 = \frac{\rho_c w_2^2}{2} + k_0 \frac{\rho_c w_2^2}{2} - \frac{\rho_c w_1^2}{2}. \quad (3)$$

Po przekształceniu

$$\Delta p_{0z} = \frac{\rho_c w_2^2}{2} \left[1 + k_0 - \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Wprowadzając

$$\sigma = \frac{A_2}{A_1}, \quad \sigma_c = \frac{A_0}{A_2}, \quad (5)$$

z równania strugi można otrzymać

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{w_1}{w_2} = \sigma. \quad (6)$$

Po wstawieniu (6) do (4) otrzymujemy

$$\Delta p_{0z} = \frac{\rho_c w_2^2}{2} [1 + k_0 - \sigma^2], \quad (7)$$

gdzie k_0 jest współczynnikiem strat i określone jest zależnością według Weisbacha [1]

$$k_0 = \left(\frac{1}{\sigma_c} - 1 \right)^2. \quad (8)$$

Szereg autorów podało różne wartości współczynnika strat, na przykład według Kaysa [4] wartość ta wynosi

$$k_0 = 0,4(1 - \sigma^2), \quad (9)$$

a według Benedicta [3]

$$k_0 = \left(\frac{1}{c_v^2 \sigma_c^2} - \frac{2}{\sigma_c} + 1 \right), \quad (10)$$

gdzie c_v jest stosunkiem prędkości rzeczywistej do idealnej w przekroju 0.

Wartości współczynnika strat k_0 , mimo różnego podejścia do problemu, były zbliżone.

2.2. Przepływ dwufazowy przy braku równowagi termodynamicznej

Problemy przepływu mieszaniny dwufazowej o przechłodzonym jądrze są dotąd mało poznane, chociaż istnieje pewna ilość prac, które podają empiryczne zależności obowiązujące w specyficznych warunkach dla ściśle określonego zakresu zmienności parametrów

przepływu. Autorzy niniejszej pracy nie spotkali publikacji, w której zajmowano by się stratami ciśnienia spowodowanymi zwężeniem przekroju w takim przepływie.

W celu opracowania własnych wyników eksperymentalnych dla tego przypadku, podjęto próbę określenia parametru, który charakteryzowałby spadek ciśnienia wywołany zwężeniem przepływu przy braku równowagi termodynamicznej. W tym celu przeprowadzono następujące rozumowanie. Spadek ciśnienia przy gwałtownie zwężającym się kanale dla przepływu dwufazowego z wrzeniem przechłodzonym określono analogicznie do (7) na podstawie [1]

$$\Delta p_{xz} = \frac{\bar{\rho} w_{2x}^2}{2} (1 + k - \sigma^2). \quad (11)$$

Gęstość mieszaniny dla przepływu dwufazowego wynosi

$$\bar{\rho} = (1 - \varphi) \rho_c + \varphi \rho_p. \quad (12)$$

Prędkość mieszaniny dwufazowej można obliczyć z równania ciągłości strugi, i tak:

– dla przepływu jednofazowego

$$w_{00} \rho_c A_0 = w_{10} \rho_c A_1 = w_{20} \rho_c A_2, \quad (13)$$

– dla przepływu dwufazowego

$$w_{0x} \bar{\rho}_0 A_0 = w_{1x} \bar{\rho}_1 A_1 = w_{2x} \bar{\rho}_2 A_2. \quad (14)$$

Porównując wartości (13) z (14) otrzymano

$$w_{20} \rho_c = w_{2x} \bar{\rho}_2. \quad (15)$$

Podstawiając do (15) zależność (12) otrzymano

$$w_{2x} = \frac{w_{20} \rho_c}{[(1 - \varphi_2) \rho_c + \varphi_2 \rho_p]}, \quad (16)$$

a podstawiając następnie (16) i (12) do (11) znaleziono:

$$\Delta p_{xz} = \frac{\rho_c w_{20}^2}{2} (1 + k_x - \sigma^2) \frac{\rho_c}{[(1 - \varphi_2) \rho_c + \varphi_2 \rho_p]}. \quad (17)$$

Odnosząc spadek ciśnienia przy przepływie dwufazowym (17) do spadku ciśnienia przy przepływie jednofazowym według Weisbacha (7), przy założeniu $k_0 = k_x$, otrzymujemy zależność

$$\frac{\Delta p_{xz}}{\Delta p_{0z}} = \frac{\rho_c}{\rho_c (1 - \varphi_2) + \varphi_2 \rho_p} = \frac{1}{(1 - \varphi_2) + \frac{\rho_p}{\rho_c} \varphi_2}, \quad (18)$$

czyli

$$\frac{\Delta p_{xz}}{\Delta p_{0z}} = f\left(\frac{\rho_p}{\rho_c}, \varphi_2\right). \quad (19)$$

Jak wynika z przeprowadzonej analizy stosunek spadku ciśnień $\Delta p_{xz}/\Delta p_{0z}$ zależny jest od gęstości cieczy i pary oraz od lokalnej zawartości pary w przekroju poprzecznym kanału φ .

Przekształcając zależność (18) uzyskano

$$\varphi = \frac{1 - \frac{\Delta p_{0z}}{\Delta p_{xz}}}{1 - \frac{\rho_p}{\rho_c}}. \quad (20)$$

Opierając się na pracy [7] stwierdzono, że dla przepływu podczas wrzenia w warunkach braku równowagi termodynamicznej, lokalna zawartość pary w przekroju poprzecznym kanału φ zależna jest od parametrów, zgodnie z równaniem

$$\varphi = f\left(\frac{t_{sw} - t_n}{t_{sw} - t_F}; p\right). \quad (21)$$

Przy założeniu, że $p = \text{const}$, wówczas i $\rho_p/\rho_c = \text{const}$, z równań (20) i (21) uzyskuje się zależność

$$\frac{1 - \frac{\Delta p_{0z}}{\Delta p_{xz}}}{1 - \frac{\rho_p}{\rho_c}} = f\left(\frac{t_{sw} - t_n}{t_{sw} - t_F}\right). \quad (22)$$

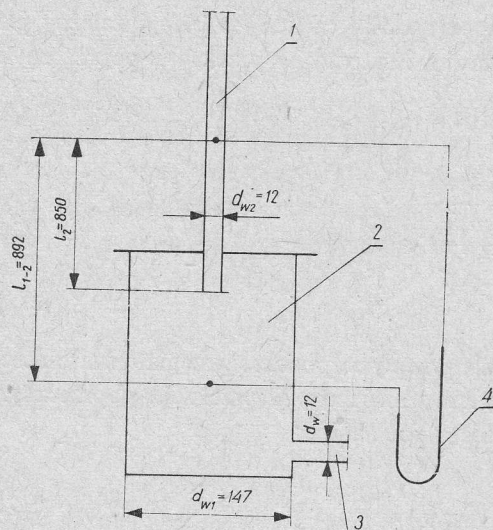
W dalszym ciągu pracy powyższą zależność badano eksperymentalnie.

3. Metoda przeprowadzania eksperymentów

Eksperymentalna część pracy dotycząca zmian ciśnienia występujących przy gwałtownym zwężeniu, wykonana została na stanowisku szczegółowo opisanym w pracach [8] i [5]. Głównymi elementami stanowiska były: podgrzewacz, parownik, separator, skraplacz i pompa obiegowa. Elementem grzewczym była para wodna, której ciśnienie wahało się w granicach 0–5 barów. Przepływ jednofazowy przez zwężenie kanału badano w warunkach izotermicznych. Ciecz tłoczona była przez pompę obiegową.

Ciśnienie w obiegu mierzono manometrami tarczowymi klasy 0,4, a spadki ciśnień za pomocą manometrów różnicowych rtęciowych z dokładnością do 1 mm słupa rtęci. Do mierzenia temperatur służyły termopary podłączone do kompensatora typu QTK Metra. Natężenie przepływu freonu 21 w obiegu określono na podstawie spadku ciśnienia w zwężce kwadrantowej. Do pomiaru tego spadku służyła waga pierścieniowa „Junkalor” o dwóch zakresach pomiarowych 0–500 kG/m² i 0–2500 kG/m².

Odcinkiem pomiarowym, na którym badano zmianę ciśnienia przy zwężeniu przekroju kanału był wlot do rury parownika. Stosunek przekrojów kanału za i przed zwężeniem wynosił $\sigma = 0,666 \cdot 10^{-2}$. Szkic z zaznaczonymi miejscami pomiaru ciśnienia 1–2



Rys. 2. Schemat gwałtownego zwężenia przekroju kanału na wlocie do parownika

1 – rura parownika, 2 – mieszalnik, 3 – rura łącząca parownik z podgrzewaczem, 4 – rtęciowy manometr różnicowy

przedstawia rysunek 2. Nietypowa konstrukcja tego odcinka wynika z faktu, że wykorzystano stanowisko, które pierwotnie służyło do innych badań.

Pomiary dla przepływu jednofazowego przeprowadzono w temperaturze otoczenia.

4. Wyniki pomiarów

4.1. Przepływ jednofazowy

W celu zbadania możliwości stosowania zależności Weisbacha do freonów przeprowadzono badania eksperymentalne freonu 21, które porównywano z wynikami uzyskanymi z zależności Weisbacha (7). Wyniki pomiarów podano w tabeli 1. Całkowity spadek

Tabela 1

Lp.	$w_2 \rho_c$ [kg/m ² s]	Δp_{0r} [bar]	Δp_o [bar]	Δp_{0z} [bar]	$(\Delta p_{0z})_w$ [bar]	Δp_{0z} wg [4] [bar]	Δp_{0z} wg [3] [bar]
	1	2	3	4	5	6	7
1	1362	0,0204	0,1551	0,0164	0,0102	0,0104	0,0119
2	1725	0,0324	0,1715	0,0207	0,0164	0,0167	0,0192
3	1930	0,0409	0,1839	0,0247	0,0205	0,0209	0,0239
4	2018	0,0447	0,1901	0,027	0,0224	0,0228	0,0262
5	2275	0,0569	0,2063	0,0311	0,0286	0,0291	0,0335
6	2510	0,0692	0,2226	0,0351	0,0347	0,0354	0,0406
7	2723	0,0816	0,239	0,039	0,0408	0,0416	0,0477
8	3355	0,1234	0,2963	0,0546	0,0618	0,063	0,0723
9	3880	0,1705	0,3573	0,0735	0,0829	0,0846	0,0969
10	4300	0,203	0,4078	0,0863	0,102	0,104	0,119
11	4710	0,2434	0,4675	0,1056	0,1224	0,1248	0,143

ciśnienia w przepływie jednofazowym składa się z sumy spadków ciśnień wywołanych tarciami Δp_{0t} , zwężeniem Δp_{0z} i spadkiem hydrostatycznym Δp_{0h}

$$\Delta p_0 = \Delta p_{0t} + \Delta p_{0z} + \Delta p_{0h}. \quad (23)$$

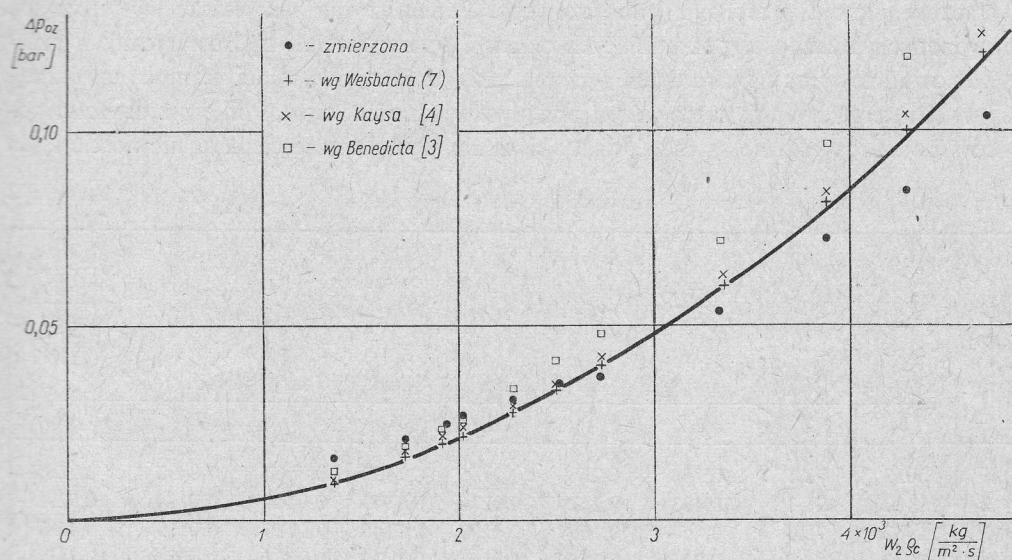
Z równania (23) po przekształceniu otrzymujemy

$$\Delta p_{0z} = \Delta p_0 - (\Delta p_{0t} + \Delta p_{0h}). \quad (24)$$

Całkowity spadek ciśnienia na odcinku pomiarowym wynosi

$$\Delta p_0 = \Delta h (\gamma_{Hg} - \gamma_F) + l_{1,2} \gamma_F, \quad (25)$$

gdzie Δh – różnica poziomów rtęci w manometrze różnicowym, γ_{Hg} , γ_F – ciężary właściwe rtęci i cieczy freonu 21 w temperaturze otoczenia, $l_{1,2}$ – długość odcinka pomiarowego ($l_{1,2} = 892$ mm).



Rys. 3. Wpływ prędkości masowej na spadek ciśnienia występujący przy zwężeniu przepływu jednofazowego

Spadek ciśnienia na tarcie w przepływie jednofazowym określono z zależności d'Arcy'ego – Weisbacha [9]

$$\Delta p_{0t} = \zeta \left(\frac{\rho_c w_1^2}{2} \frac{l_1}{dw_1} + \frac{\rho_c w_2^2}{2} \frac{l_2}{dw_2} \right), \quad (26)$$

gdzie ζ – współczynnik tarcia w przepływie jednofazowym ($\zeta = 0,0387$) według [8], l_1 – długość rury o przekroju dw_1 ($l_1 = 42$ mm), dw_1 – średnica rury ($dw_1 = 147$ mm), l_2 – długość rury o przekroju dw_2 ($l_2 = 850$ mm), dw_2 – średnica rury ($dw_2 = 12$ mm), w_1 , w_2 – prędkości freonu 21 na różnych odcinkach rury, ρ_c – gęstość freonu w temperaturze otoczenia.

Spadek ciśnienia hydrostatycznego wyznaczono z zależności

$$\Delta p_{0h} = l_{1-2} \gamma_F. \quad (27)$$

Wartości spadków ciśnień wywołane gwałtownym zwężeniem przekroju kanału przy przepływie jednofazowym obliczono według (24) i przedstawiono w tabeli 1. W tabeli tej podano też wartości spadków ciśnień obliczonych według Weisbacha (wzór (7)) oraz Kaysa [4] i Benedicta i in. [3]. Wartości spadków ciśnień otrzymanych metodą eksperymentalną oraz według zależności teoretycznych porównano ze sobą na wykresie (rys. 3) zależności $\Delta p_{0z} = f(w_2 \rho_c)$.

Jak wynika z wykresu, uzyskano dużą zgodność eksperymentu z obliczeniami według Weisbacha (wzór (7)), Kaysa [4] i Benedicta [3].

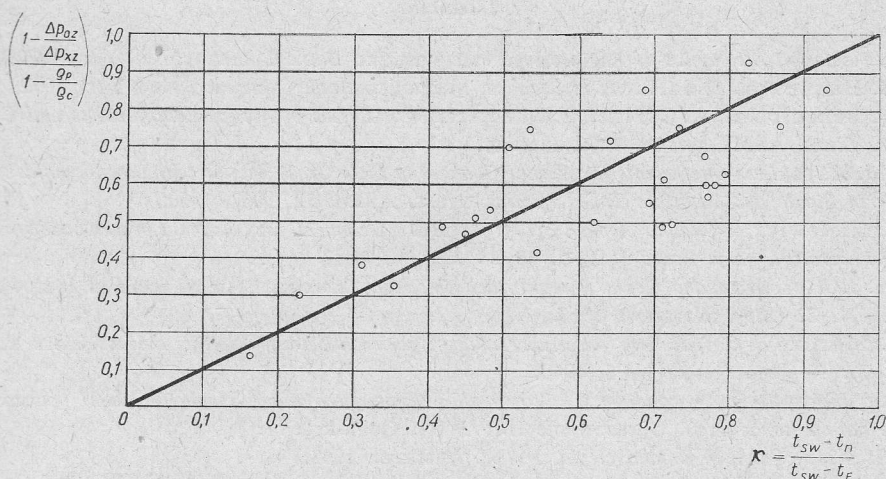
4.2. Przepływ dwufazowy

Pomiary całkowitych spadków ciśnienia Δp_x na odcinku pomiarowym 1 - 2 wykonano identycznie jak dla przepływu jednofazowego. Ponieważ nie ma jeszcze wystarczająco sprawdzonych zależności pozwalających obliczyć opory: tarcia i hydrostatyczny w przepływie dwufazowym w warunkach wrzenia przy braku równowagi termodynamicznej, traktowano te straty, tak samo jak w przepływie jednofazowym. Ponieważ długości odcinków pomiarowych nie są duże, straty ciśnienia wywołane tarciami są niewielkie i ten

Tabela 2

Lp.	$w\rho$	t_n	$\frac{t_{sw} - t_n}{t_{sw} - t_F}$	Δp_x	Δp_{xt}	Δp_{xh}	Δp_{xz}	$(\Delta p_{0z})_w$	$1 - \frac{\Delta p_{0z}}{\Delta p_{xz}}$
	[kg/m ² s]	[°C]		[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]	$1 - \frac{\rho_p}{\rho_c}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3010	73,5	0,164	0,2683	0,0985	0,1138	0,0560	0,0493	0,1265
2	1482	76,3	0,483	0,1624	0,0236	0,1143	0,0245	0,0119	0,529
3	1482	75,3	0,45	0,1597	0,0239	0,1145	0,0216	0,0119	0,4687
4	1200	81,0	0,735	0,1565	0,0166	0,112	0,0277	0,008	0,748
5	3005	95,2	0,715	0,344	0,109	0,107	0,128	0,0488	0,645
6	1202	90	0,931	0,1714	0,0172	0,109	0,0452	0,08	0,857
7	2443	88,5	0,227	0,2137	0,0591	0,1128	0,0418	0,0297	0,302
8	2081	95	0,62	0,2049	0,0523	0,108	0,0446	0,0232	0,502
9	1803	82,5	0,31	0,1818	0,0363	0,1173	0,0282	0,0178	0,384
10	3025	94,2	0,771	0,338	0,111	0,107	0,120	0,05	0,608
11	2080	83	0,358	0,2931	0,0519	0,116	0,0352	0,0232	0,355
12	1656	92	0,768	0,1796	0,0328	0,108	0,0388	0,0144	0,655

sposób obliczeń nie powoduje dużych błędów. Do obliczeń spadków ciśnień używano zależności (24), (25), (26) i (27). Wartości obliczonych w ten sposób ciśnień Δp_{xz} odnoszono do spadków ciśnień w przepływie jednofazowym otrzymanych według Weisbacha — wzór (7) (por. tab. 2). Eksperymenty starano się skorelować za pomocą zaproponowanej funkcji (22) (rys. 4). Sposób określenia temperatur występujących w tej funkcji podany jest w [8].



Rys. 4. Zależność zmiany ciśnienia wywołanej zwężeniem przepływu dwufazowego przy braku równowagi termodynamicznej

Jak można wnioskować z ułożenia punktów pomiarowych na rysunku 4, zależność $1 - \frac{\Delta p_{0z}}{\Delta p_{xz}}$ od parametru $\frac{t_{sw} - t_n}{t_{sw} - t_F}$ jest niewątpliwa. Prawdopodobnie istnieją jeszcze inne parametry, na przykład ciśnienie, co jednak nie ujawniło się tu w sposób wyraźny ze względu na wąski zakres zmienności parametrów.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania freonu 21 dla przepływu jednofazowego przy gwałtownym zwężeniu kanału wypełniają istniejącą lukę w eksperymentach, które dotyczą w zasadzie tylko jednego czynnika — wody.

Porównanie eksperymentalnych badań dla freonu 21 z zależnością teoretyczną Weisbacha (7) wykazuje dużą zgodność i potwierdza stosowalność tej zależności do innych czynników. Odnosnie do badań dotyczących spadków ciśnienia przy zwężeniu kanału w warunkach wrzenia przechłodzonego należy zaznaczyć, że wykres dotyczy tylko freonu 21. Niemożliwe było porównanie badań z innymi pracami z powodu ich braku. Badania nad innymi czynnikami pozwolą na uogólnienie przyjętej metody. Eksperymenty były przeprowadzone dla jednej geometrii kanału, przy istnieniu rozbiegu termicznego i hydraulicznego. Nie uwzględniono też wpływu strumienia cieplnego.

Literatura

- [1] J. Weisbach, *Mechanics of Engineering*. Van Nostrand Book Company, New York 1872, p. 821.
- [2] H. J. Hughes, A. T. Saffard, *Hydraulics*. Macmillan Book Company, New York 1912, p. 297.
- [3] R. P. Benedict, N. A. Carluci, S. D. Swetz, *Flow Losses in Abrupt Enlargements and Contractions*. Trans. ASME ser. A. 1966, January.
- [4] W. M. Kays, *Less Coefficients for Abrupt Changes in Flow Cross Section with Low Reynolds Number Flow in Single and Multiple Tube Systems*. Trans. ASME 72, 1067, 1950.
- [5] J. Mikielwicz, *Wymiana ciepła i opory przepływu freonu-21 przy wrzeniu przechłodzonym w kanale generatora pary*. Prace IMP, z. 60, 1972.
- [6] P. A. Lottes, *Wymiana ciepła w reaktorach chłodzonych wodą*. Postępy Techniki Jądrowej. Dodatki Nr 22 (119), Warszawa 1963.
- [7] I. I. Morozov, *Ob istinnom parosodierżanii pri poverchnostnom kipienii dvizhuščej się v kanalach židkosti*. Tjeploenergetika Nr 3, 1968.
- [8] Praca zbiorowa, *Sprawozdanie z wyników badań z zakresu wymiany ciepła freonu-21 podczas generacji pary i kondensacji*. Opracowanie IMP PAN, Gdańsk 1971.
- [9] B. Staniszewski, *Wymiana ciepła*. PWN, Warszawa 1963.

Изменения давления вызванные внезапным сужением однофазного и двухфазного потоков в условиях отсутствия термодинамического равновесия

Резюме

В работе представлены результаты исследований перепадов давления при внезапном сужении однофазного и двухфазного потоков в условиях отсутствия термодинамического равновесия (переохлажденное кипение). В обоих этих случаях рабочей средой являлся фреон Ф-21. Полученные результаты для однофазного течения сравнивались с зависимостью Вейсбаха [7], причем получалась хорошая сходимость и подтверждение применимости этой зависимости относительно других сред.

В случае двухфазного течения, при отсутствии термодинамического равновесия, выводятся новые зависимости, определяющие связи между перепадом давления и параметрами течения. Эта зависимость представлена уравнением (22) в безразмерной форме и проверена экспериментально. На основе расположения экспериментальных точек на рис. 4 можно сделать вывод, что зависимость выражения $1 - \Delta p_{0z} / \Delta p_{xz} / 1 - \rho_p / \rho_0$ от параметра $t_{sw} - t_n / t_{sw} - t_F$ является бесспорной.

Pressure Changes Due to Sharp Contraction of Single-Phase or Two-Phase Flow in Conditions of Thermal Non-Equilibrium

Summary

The paper gives the results of investigation of the pressure drop caused by the abrupt contraction of flow of a single-phase and two-phase medium in thermal non-equilibrium (subcooled boiling). In the both cases Freon-21 was used as the examined medium. The results obtained for the single-phase flow were compared with the Weisbach relation [7], a good coincidence having been stated and the applicability of the Weisbach relation to different media having been confirmed.

Novel relations linking the pressure drop with the flow parameters have been derived for the two-phase flow in the thermal non-equilibrium. The relation has been written in the form of the dimensionless equation (22) and examined experimentally. As may be inferred from the location of the measuring points in fig. 1, the dependence of $1 - \Delta p_{0z} / \Delta p_{xz} / 1 - \rho_p / \rho_c$ on the parameter $t_{sw} - t_n / t_{sw} - t_F$ is undoubted.

Jednym z problemów, związanych z wprowadzaniem czynników niskowrzących jako czynników roboczych w energetyce, jest intensyfikacja przejmowania ciepła, także przy skraplaniu [1]. Przyczyną takiego stanu rzeczy są niekorzystne właściwości czynników niskowrzących z punktu widzenia wymiany ciepła [3]. Wiele względów przemawia za tym, że jednym z lepszych czynników roboczych w obiegu niskotemperaturowym będzie freon-21 [1, 2]. Z tego powodu czynnik ten jest przedmiotem zainteresowania – poza Instytutem Maszyn Przepływowych PAN – także w innych ośrodkach zajmujących się badaniami związanymi z koncepcją siłowni dwuczynnikowej [4, 5].

W związku z tym na stanowisku eksperymentalnym do badania wymiany ciepła i oporów przepływu w IMP PAN przeprowadzono badania doświadczalne wymiany ciepła podczas kondensacji pary freonu-21.

Celem badań było znalezienie współczynników przejmowania ciepła przy kondensacji freonu-21 na rurze żebrowanej i porównanie z wynikami otrzymanymi przez innych autorów [4, 5], jak również sprawdzenie zależności teoretycznych. W technice chłodniczej z zasady stosuje się rozwinięcie powierzchni po stronie skraplanej pary, najczęściej w postaci nawalcowania na zewnętrznej powierzchni rur tzw. „niskich” żeber [6]. Takich właśnie rur użyto do budowy eksperymentalnego skraplacza.

W pracy [7] podano szereg metod intensyfikacji przejmowania ciepła przy skraplaniu. Spośród nich, metoda polegająca na zastosowaniu rur z nawalcowanymi poprzecznym niskimi żebrami wydaje się mieć największe perspektywy, jeżeli chodzi o zastosowanie w dużych skraplaczach czynnika niskowrzącego w siłowni dwuczynnikowej. Jak wykazano [8], przy odpowiednim doborze kształtu żeber, poza zwiększeniem powierzchni można się spodziewać także wzrostu współczynnika przejmowania ciepła α na skutek efektu oddziaływania sił napięcia powierzchniowego.

2. Opis stoiska doświadczalnego

Badania wymiany ciepła przy skraplaniu par freonu-21 przeprowadzono na stoisku doświadczalnym, przedstawionym schematycznie na rys. 1.

Woda chłodząca skraplacz była pobierana z grawitacyjnego zbiornika wyrównawczego, w celu zapewnienia stałości natężenia przepływu wody (prędkości wody w rurze) w trakcie pomiaru. Natężenie przepływu wody chłodzącej skraplacz mierzono wyskalowanym zbiornikiem pomiarowym. Para freonu płynęła do skraplacza z separatora cyklonowego, zainstalowanego za parownikiem, którego opis nie wchodzi w zakres niniejszej pracy.

Kondensat freonu-21 ściekał ze skraplacza do zbiornika kondensatu, a stąd do zbiornika wyrównawczego. Schemat badanego skraplacza z zaznaczonymi punktami pomiarowymi przedstawiony jest na rys. 2.

Obudowę usytuowanego poziomo skraplacza stanowił korpus z okrągłej stalowej rury o średnicy wewnętrznej $d_w = 219$ mm i długości 940 mm. Płaszcz skraplacza był izolowany z zewnątrz tkaniną azbestową. Dwie pokrywy przykręcane śrubami zamykały korpus z obu stron. Przez jedną z pokryw przechodziły dwie rury: doprowadzająca i odprowadzająca wodę do chłodzenia skraplacza. Pokrywy także zaizolowano tkaniną azbe-