

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

STEFAN KRZECZKOWSKI, ANDRZEJ GARDZILEWICZ

Gdańsk

Widmo kropeł za elementami separującymi różnej zwilżalności*

W opracowaniu przedstawiono wyniki badań widma kropeł zrywających się z siatkowych elementów separujących przy pracy w zakresie prędkości fazy nośnej przekraczających wartości krytyczne.

Spis oznaczeń

A – pole przekroju siatki (prostopadłego do wektora prędkości fazy nośnej) [m ²],	N – wskaźnik gęstości siatki [m ² /m ³],
a, b – wymiary oczek siatki [mm],	p – ciśnienie [bar, N/m ²],
d – średnica kropli [mm, μm],	r – promień kropli [mm, μm],
$f(d), f(r)$ – funkcja rozkładu wielkości kropeł [mm ⁻¹],	v – objętość [m ³],
$f(v)$ – funkcja rozkładu objętości (masy) kropeł [mm ⁻¹],	w – prędkość [m/s],
l – grubość pakietu separującego [mm],	y – zawilgocenie,
	ε – porowatość siatki,
	ρ – gęstość [kg/m ³].
	Indeks
	dr – drut.

1. Wstęp

Separacja bezwładnościowa rozproszonej fazy ciekłej w ośrodku gazowym realizowana jest zwykle przy zastosowaniu elementów kształtowych typu żaluzje i siatki. Praca takich elementów podlega istotnym ograniczeniom. Jednym z nich jest ponowne wrywanie wyseparowanej cieczy i jej powrót do przepływu przy prędkościach zwanych krytycznymi. Krytyczna prędkość mieszaniny ograniczająca obszar „stabilności”**) uzależniona jest od szeregu czynników. Dla warunków ważnych technicznie zawiera się w wąskich granicach rzędu jedności, a najwyżej dziesiątek m/s***). Prędkość ta jest istotną wskazówką dla konstruktora separatorów i narzuca określone minimalne przekroje przelotów, a przy

* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 2.

**) Przez to pojęcie autorzy rozumieją przepływ wyseparowanej cieczy nie podlegający wtórnemu wrywaniu kropeł.

***) Dla separacji mieszaniny wodno-powietrznej na siatkach wynosi ona 2÷8 m/s [1].

eksploatacji urządzeń nie może być przekraczana nawet lokalnie. Ograniczenie prędkości utrudnia jednak realizowanie separacji drobnodispersyjnych mieszanin (krople rzędu kilku mikrometrów), bowiem efektywność osiadania i separacji bezwładnościowej rośnie wraz z prędkością fazy nośnej [1, 2, 3].

Autorów niniejszego opracowania interesuje zachowanie się wydzielonej na wkładach separujących fazy ciekłej w zakresie prędkości przepływu przekraczających wartości krytyczne. W szczególności chodzi tu o zbadanie widma kropeł wtórnie uformowanych za elementem separującym. W takim zakresie pracy wkład separująco-bezwładnościowy typu żaluzja lub siatka należy traktować jako element koagulujący drobno dyspersyjną fazę ciekłą. Elementy takie zdają się być bardzo obiecujące przy pracy w układzie szeregowym, wspólnie z prostą żaluzją lub cyklonem wychwytyjącym duże krople wtórne. Trzeba jednakże pamiętać, że konstrukcyjne optimum układów separujących wyznaczone jest trzema, nie zawsze zgodnymi czynnikami:

- sprawnością separacji,
- stratami przepływu,
- gabarytami lub kosztami.

2. Przedmiot badań oraz opis stoiska i zastosowanych metod pomiarowych

Badania zdolności koagulacyjnej elementów separujących wykonano na wkładach siatkowych omywanych mieszaniną powietrzno-wodną, w układzie pionowym. Wkłady takie stosowane są powszechnie w przemyśle chemicznym dla usuwania z przepływu gazu kropeł cieczy rzędu mikrometrów i większych. Zjawisko koagulacji cieczy na takich elementach jest powszechnie znane i obserwowane. Wiadomo też, że rozmiary kropeł wtórnych, wrywanych z wkładów przy prędkościach ponadkrytycznych, są w większości zastosowań technicznych znacznie większe od kropeł pierwotnych. Ich wielkość zależy przede wszystkim od współdziałania sił aerodynamicznych, grawitacyjnych i napięcia powierzchniowego. Funkcje rozkładu takich kropeł, a także sam mechanizm ich zrywania z elementów separujących, nie jest dostatecznie zbadany. W niniejszej pracy autorzy próbowali dać odpowiedź na pytanie, jaka jest rola siatki jako „przetwornika” drobnych kropeł pierwotnych w duże. Próbowano również ocenić wpływ niektórych czynników na procesy zrywania kropeł.

Dobre siatki oraz parametry czynnika dwufazowego zapewniały niemal całkowity rozdział faz przy pracy w obszarze podkrytycznym. W ten sposób wyeliminowano możliwość przejścia kropeł pierwotnych przez badane wkłady.

Do badań użyto siatek o różnej konfiguracji geometrycznej włókien. Dobrano je z katalogów firm zagranicznych [4, 5]. Zestaw danych badanych wkładów pokazano w tabeli 1. Zmieniano również zwilżalność materiałów używanych do wykonania pakietów siatkowych. Pakiety były wykonane w dwóch wersjach: ze stali nierdzewnej i z teflonu. Zwilżalność materiału zwykle określa się za pomocą kąta granicznego określonego metodą leżącej kropli na płaskiej powierzchni. Z literatury [9, 10] znane są wartości kąta granicznego dla powierzchni stalowej i teflonowej. Wnoszą one odpowiednio: w gra-

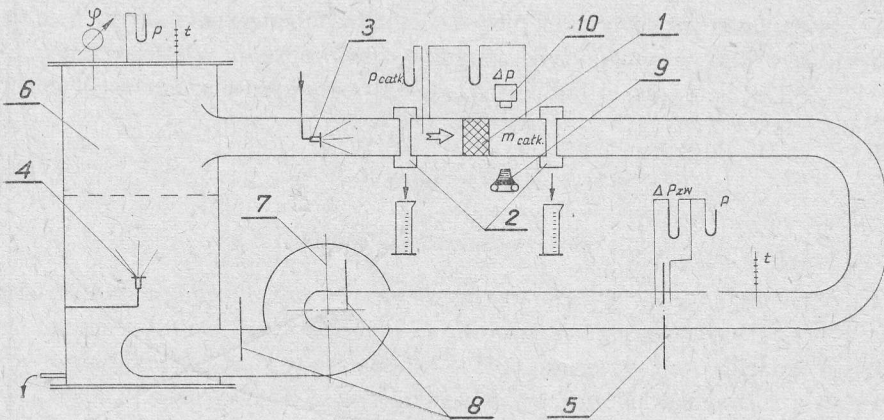
Tabela 1

Charakterystyki badanych wkładów

Lp.	Wkład siatkowy	Materiał	Grubość drutu δ [mm]	Oczka siatek d [mm]	Szerokość pakietu g [mm]	Porowatość ε [-]	Wskaźnik gęstości N [m ² /m ³]
1	Siatka firmy VFF (RFN)	stal nierdzewna	0,25	5 × 5	25	0,94 ± 0,02	950
2	Siatka „homogeniczna”	„	0,05	—	25	0,9 ± 0,02	8000
3	Siatka firmy Begg Cousland	„	0,28	4 × 4	25	0,96 ± 0,02	600
4	Siatka firmy Begg Cousland	stal teflonowa	0,32	4 × 4	25	0,92 ± 0,01	950
5	Wiórki „homogeniczne”	teflon	0,15 × × 0,5 ÷ 2	—	25	0,86 ± 0,02	4000

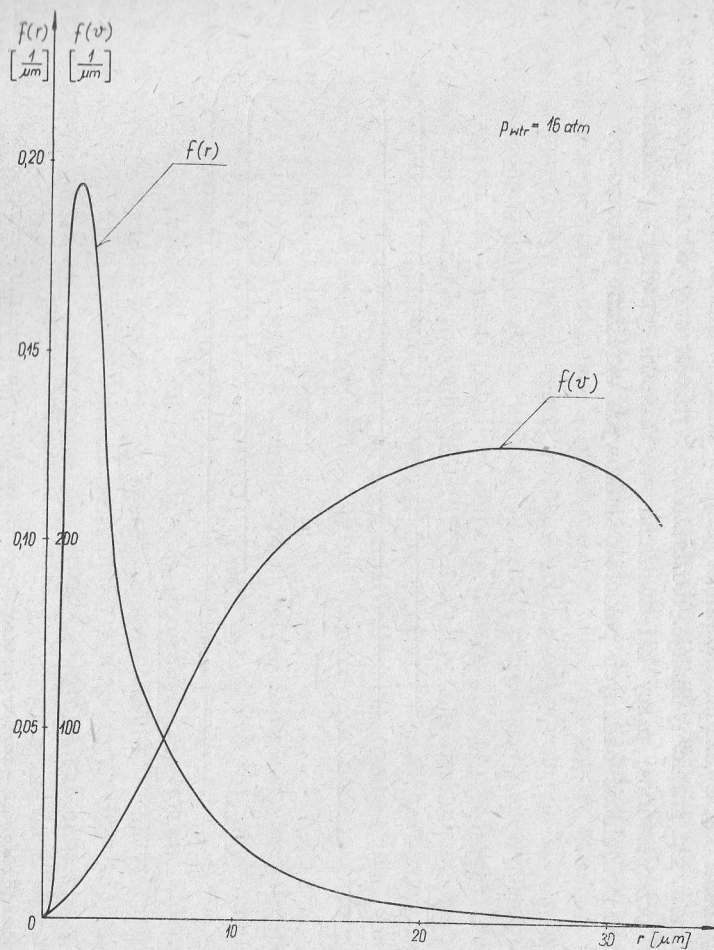
nicach 70° dla stali i 110° dla teflonu. Oznacza to więc znacznie mniejszą zwilżalność teflonu w porównaniu ze stalą. Podane wartości kąta granicznego w przypadku zawieszania kropeł na drutach siatki, ze względu na odmienną geometrię układu, mogą być zupełnie odmienne. Próby określenia wpływu średnicy drutu (nici) na kąt graniczny wykonał Mack [11]. Wynika z nich, że ze wzrostem wielkości kropli, przy tej samej średnicy drutu, rośnie kąt zwilżania, natomiast przy tej samej wielkości kropli, a rosnącej średnicy drutu, kąt graniczny maleje. Rozbieżności wyników były jednak bardzo duże.

W przedstawionej pracy kąt zwilżania nie stanowił głównego przedmiotu badań, stąd też zwilżalność badanych pakietów siatkowych określano jakościowo.

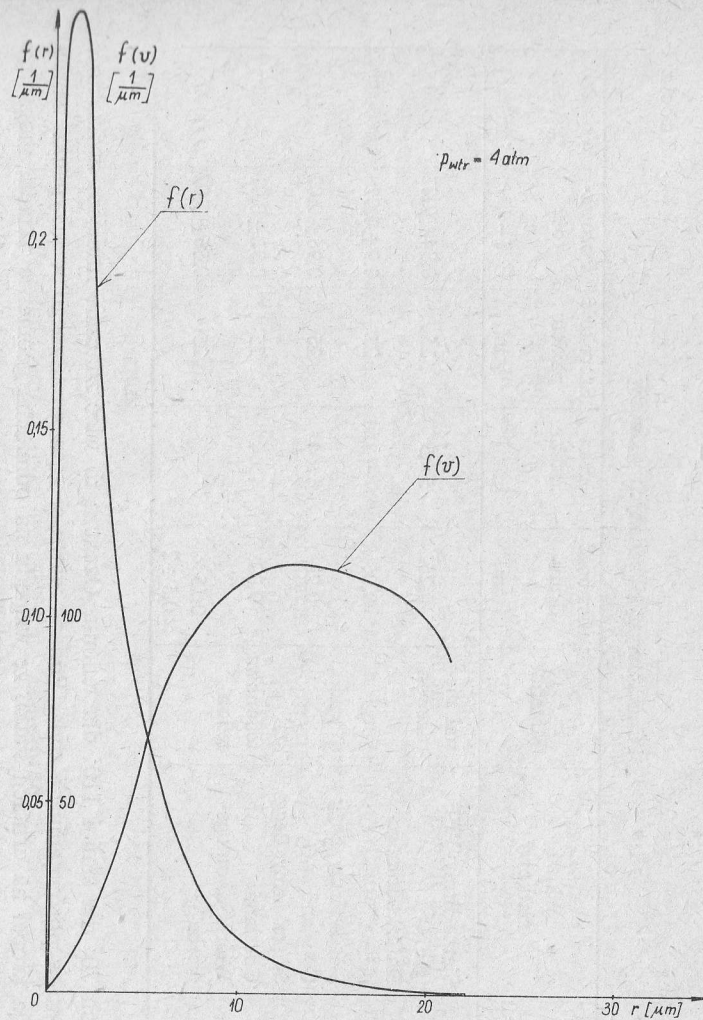


Rys. 1. Schemat stoiska badawczego

1 – komora pomiarowa, 2 – szczeliny odsysające, 3 – wtryskiwacz I, 4 – wtryskiwacz II, 5 – zwężka pomiarowa, 6 – zbiornik nawilżający, 7 – wentylator, 8 – zasowy, 9 – aparat fotograficzny, 10 – lampa błyskowa



Rys. 2. Przebieg funkcji rozkładu ilości i masy kropek pierwotnych dla $p = 16 \text{ atm}$



Rys. 3. Przebieg funkcji rozkładu ilości i masy kropek pierwotnych dla $p = 4 \text{ atm}$

Schemat stoiska wraz z oznaczonymi punktami pomiarowymi przedstawiono na rys.

1. Składa się ono z następujących ważniejszych części:

- komory pomiarowej (100 × 60 × 500 mm),
- zbiornika wyrównawczego z nawilżaczem,
- układów zasilających powietrznego i wodnego.

Zainstalowany wentylator promieniowy (SW-20) oraz wodna pompa tłokowa pozwala na osiągnięcie w komorze prędkości do 30 m/s przy zawilgoceniu $\gamma \approx 10 \div 30\%$. W czasie badań na wlocie do komory utrzymywano stałe zawilgocenie wynoszące $\gamma = 10\%$. Masowe natężenie przepływu określano przy użyciu sond pneumatycznych lub zwięzki pomiarowej, ilość wtryskiwanej wody natomiast przy użyciu naczyń miarowych*). Istotne w badaniach wielkości kropeł wtórnych określano metodą fotograficzną. Zdjęcia wykonywano lustrzanym aparatem małoobrazkowym typu Praktina FX o obiektywie Sonnar 2,8/180 firmy Zeiss Jena. Krople oświetlano lampą iskrową skierowaną wprost w obiektyw aparatu. Dane lampy: firma RFT (typ Funkenblitzgerät FG1), światłość błysku $1,5 \cdot 10^6$ cd, czas trwania błysku $1,5 \cdot 10^{-6}$ s.

Tabela 2

Pomiar widma kropeł za pomocą sondy igłowej

Ciśnienie wtrysku wody [bar]	Średnia liczba zliczeń [1/min] dla odległości między końcówkami sondy s [μm]						
	$s=7,5$	$s=15$	$s=25$	$s=35$	$s=45$	$s=55$	$s=65$
4	28,44	5,64	4,56	1,00	1,2	0,2	0
16	48,36	8,04	6,24	2,04	0	—	—

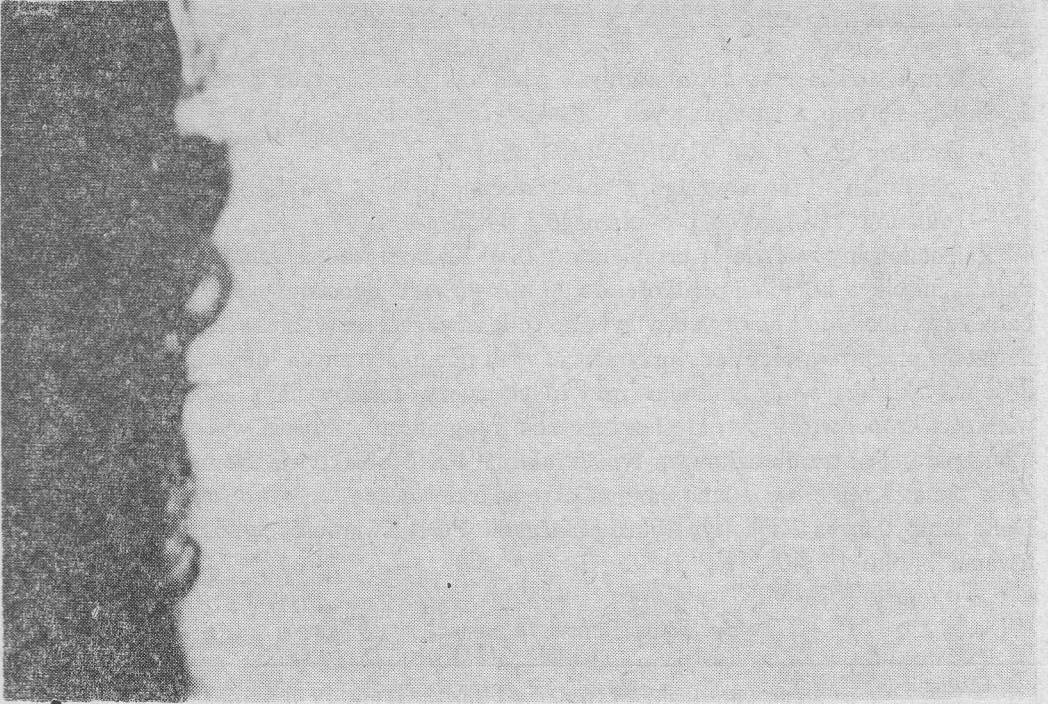
Pomiar widma kropeł pierwotnych wykonano także przy użyciu sondy igłowej opracowanej w IMP PAN [7]. Ilości zarejestrowanych kropeł w funkcji odległości między końcówkami sondy przedstawiono w tabeli 2. Pomiar ten wykonano dla minimalnego i maksymalnego wtrysku wody stosowanego w badaniach. Stwierdzono, że dla takiego zakresu ciśnień wtrysku maksymalne średnice kropeł pierwotnych nie przekraczały 70 μm . Powyższe wyniki zostały unormowane według zasady $f(r)dr=1$, przy wykorzystaniu aproksymacji logarytmiczno-normalnej [8]; przedstawiono je na rys. 2 i 3.

3. Wyniki badań

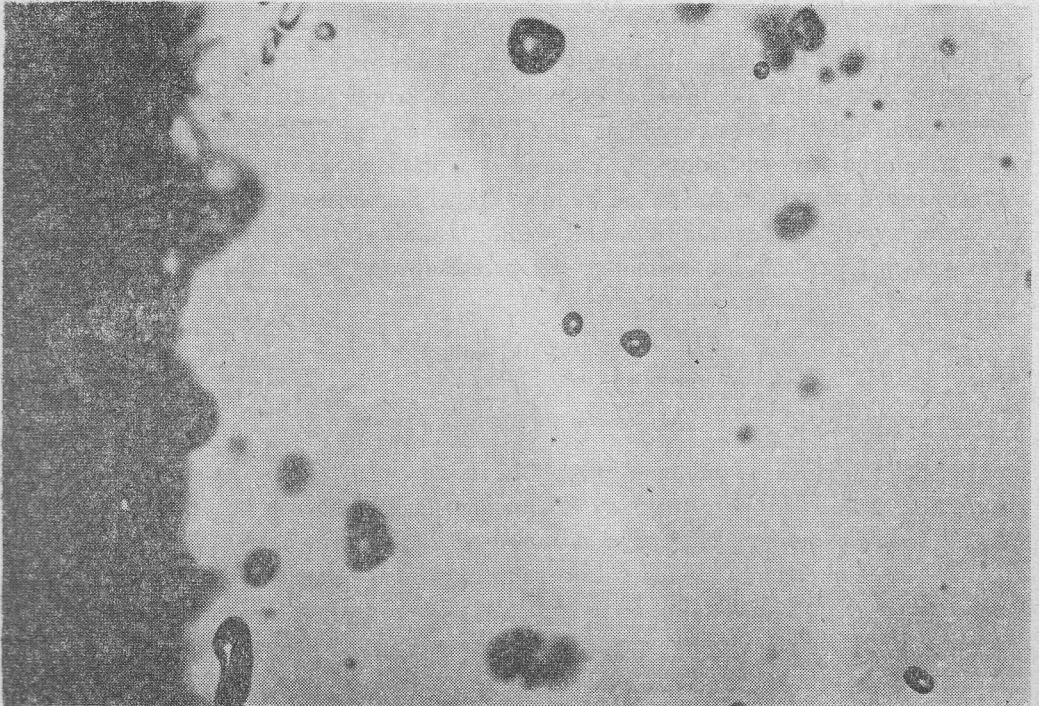
3.1. Sposób opracowania wyników

Materiał fotograficzny obrazów przepływu został przetworzony na funkcje rozkładu promieni oraz masy kropeł. Rozkłady te uzyskano drogą obliczeń kropeł, które rozdzielono na odpowiednie przedziały w granicach $0 \div 2000$ μm , przy czym wielkość przedziału $\Delta r = 100 \div 200$ μm . Dolna granica całego zakresu pomiarowego wynikająca z określonej rozdzielczości zespołu obiektywów – materiał negatywowo wynosiła 50 μm . Niektóre z otrzymanych fotografii oraz typowy sposób wykreślenia funkcji rozkładu dla siatki stalowej

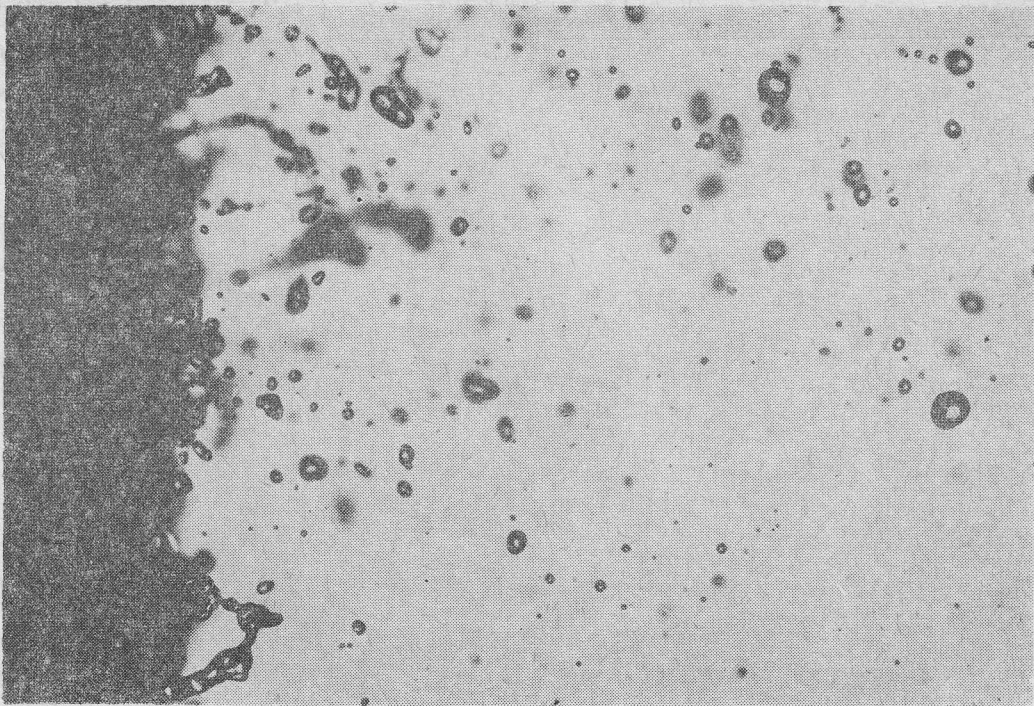
*) Przepływ mieszaniny wodno-powietrznej miał charakter izotermiczny (temperatura zmieniała się $18 \div 22^\circ\text{C}$).



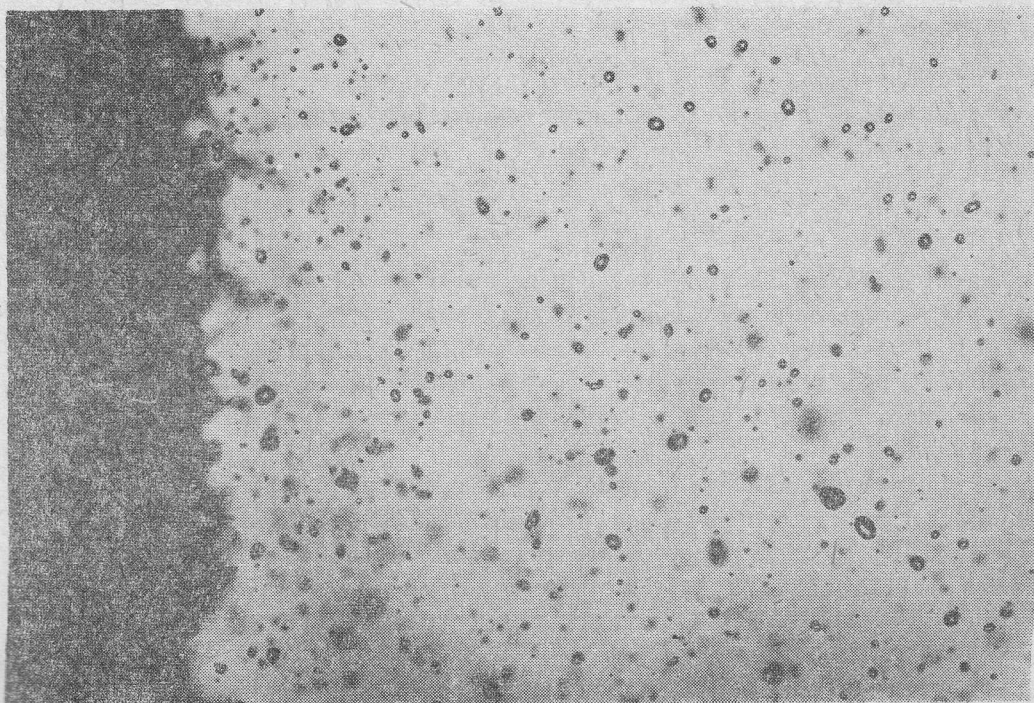
Rys. 4. Przepływ za siatką nr 1, $w=4$ m/s (pow. $4\times$), prędkość podkrytyczna



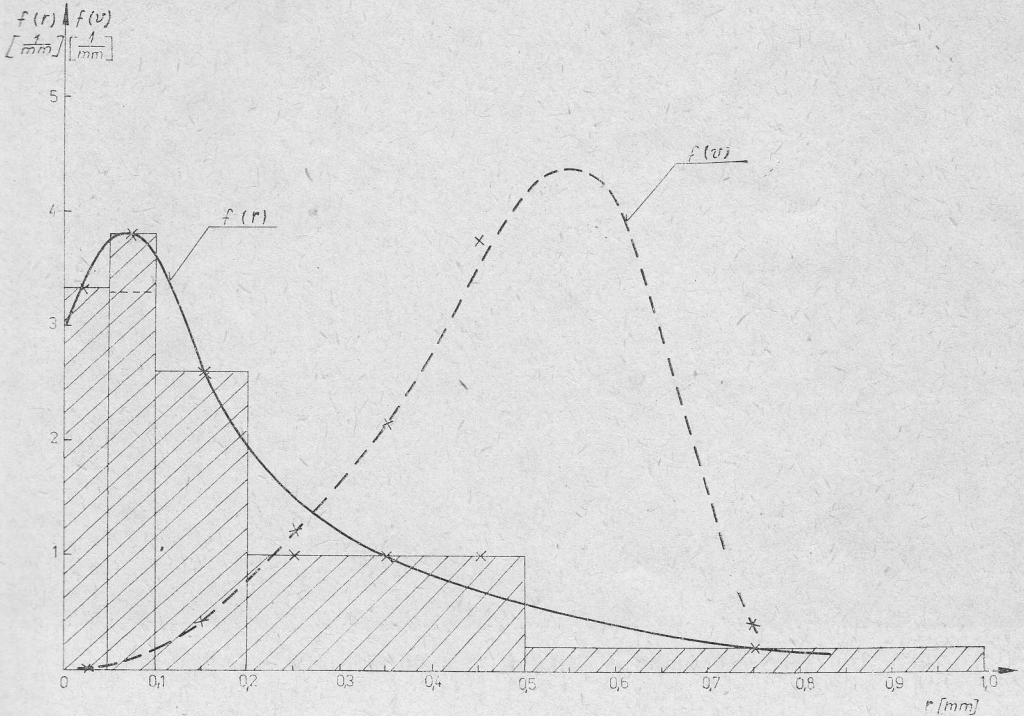
Rys. 5. Przepływ za siatką nr 1, $w=10$ m/s, (pow. $4\times$)



Rys. 6. Przepływ za siatką nr 1, $w=16$ m/s, (pow. $4\times$)



Rys. 7. Przepływ za siatką nr 1, $w=27,5$ m/s, (pow. $4\times$)



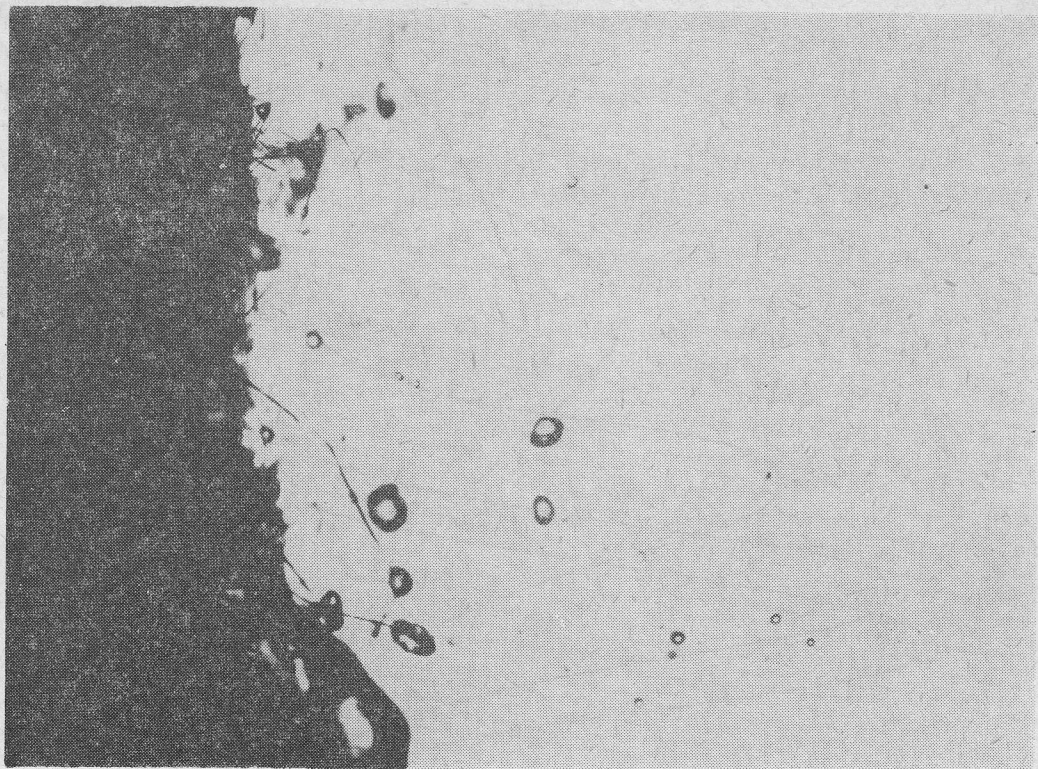
Rys. 8. Przebieg funkcji rozkładu masy i kropeł dla siatki nr 1, $w=10$ m/s, $\gamma=10\%$

nr 1 pokazano na rys. 4, 5, 6, 7 i 8. Dla tego przypadku prędkości fazy gazowej zmieniano w granicach $4 \div 27,5$ m/s. Przebiegi funkcji rozkładu były następnie znormowane według zasady:

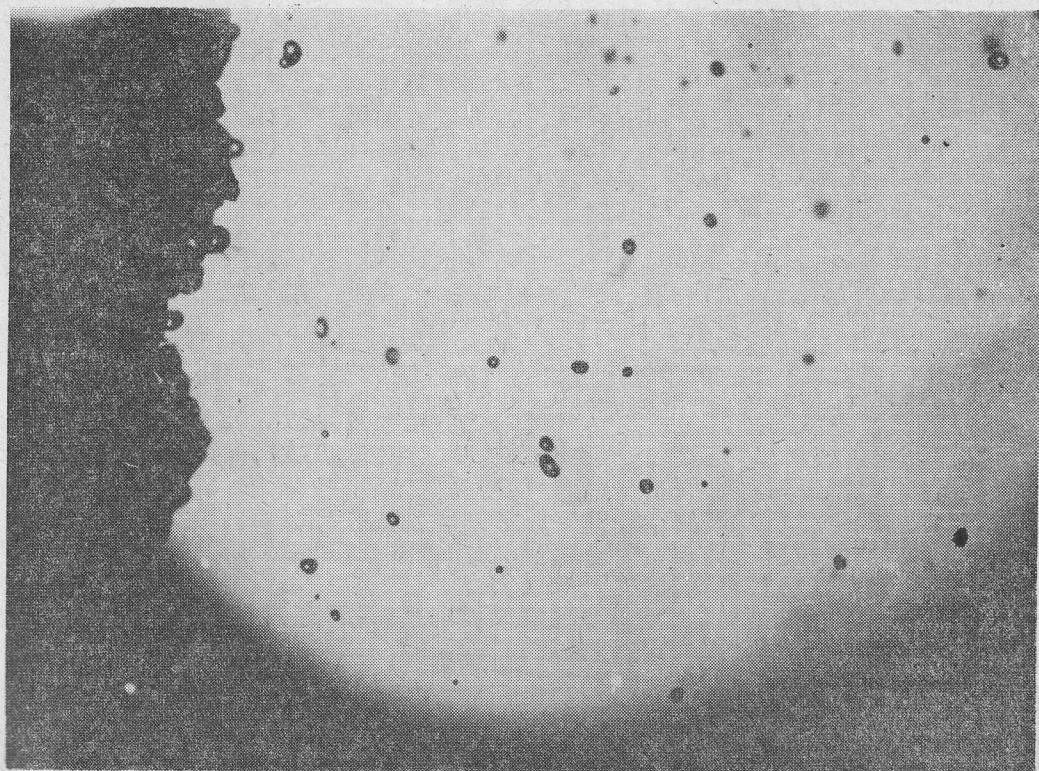
$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r) dr = 1, \quad \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(v) dr = 1.$$

Na dalszych fotografiach przedstawiono niektóre typowe obrazy dla pozostałych siatek; na rys. 9 – fragment procesu zrywania kropeł z homogenicznej siatki stalowej nr 2, a na rys. 10 – fragmenty procesów zrywania kropeł z wkładu teflonowego (nr 5). Uwagę zwraca brak strug przy siatkach teflonowanych. Spływająca ciecz zrywana jest tam w postaci foremnych kulistych kropeł. Rezultaty pomiarów zebrano przedstawiając następujące wielkości:

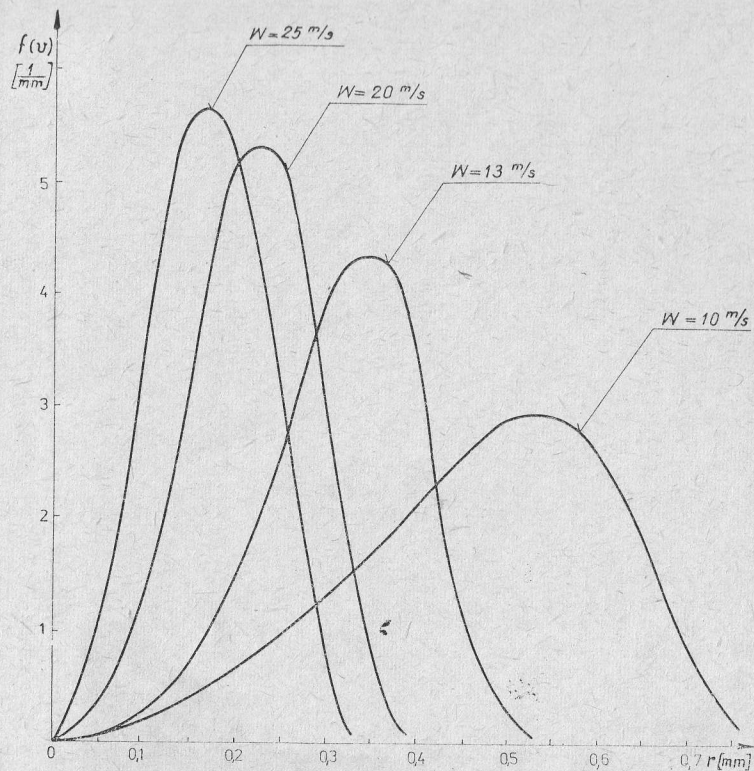
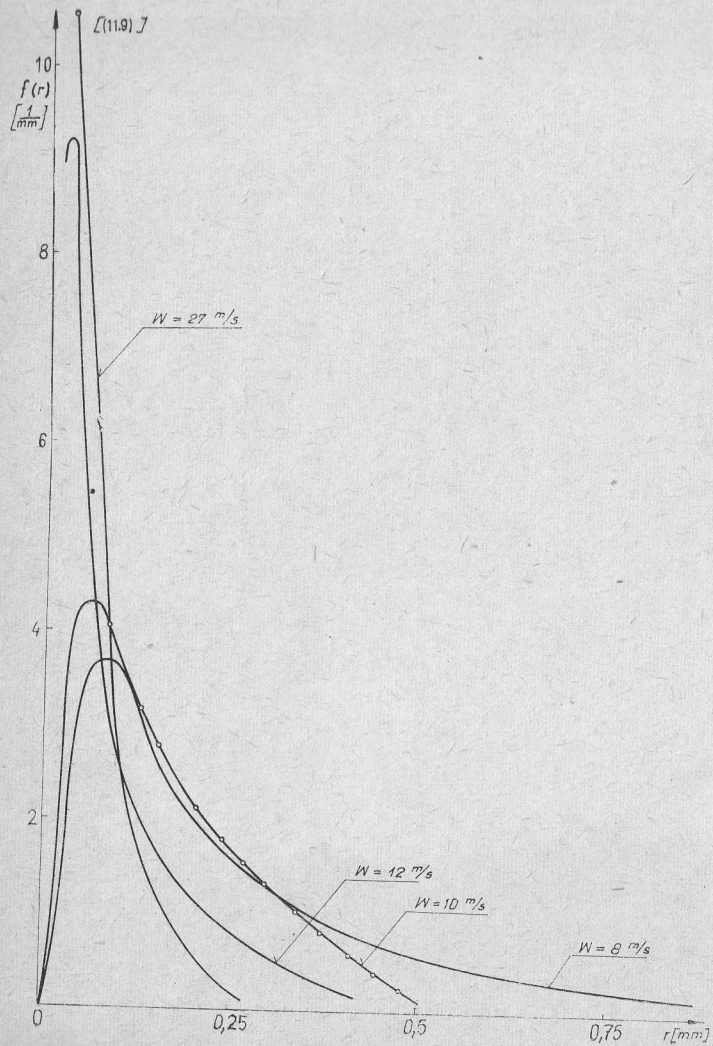
- funkcje rozkładu masy i promieni kropeł dla każdego przebadanego układu przedstawiono przy różnych prędkościach (prędkości gazu jako parametr),
- wykresy promieni kropeł odpowiadających maksymalnemu rozkładowi wartości funkcji rozkładu masy dla różnych prędkości fazy nośnej,
- wykresy maksymalnych promieni kropeł spotykanych w przepływie, w funkcji prędkości,
- wykresy promieni odpowiadających maksymalnym wartościom funkcji rozkładu średnic dla różnych prędkości.



Rys. 9. Przepływ za siatką nr 2 (typ filtr), $w=13$ m/s (pow. $5\times$)



Rys. 10. Przepływ za siatką nr 5 (typ filtr teflonowy), $w=17$ m/s (pow. ok. $3,5\times$)

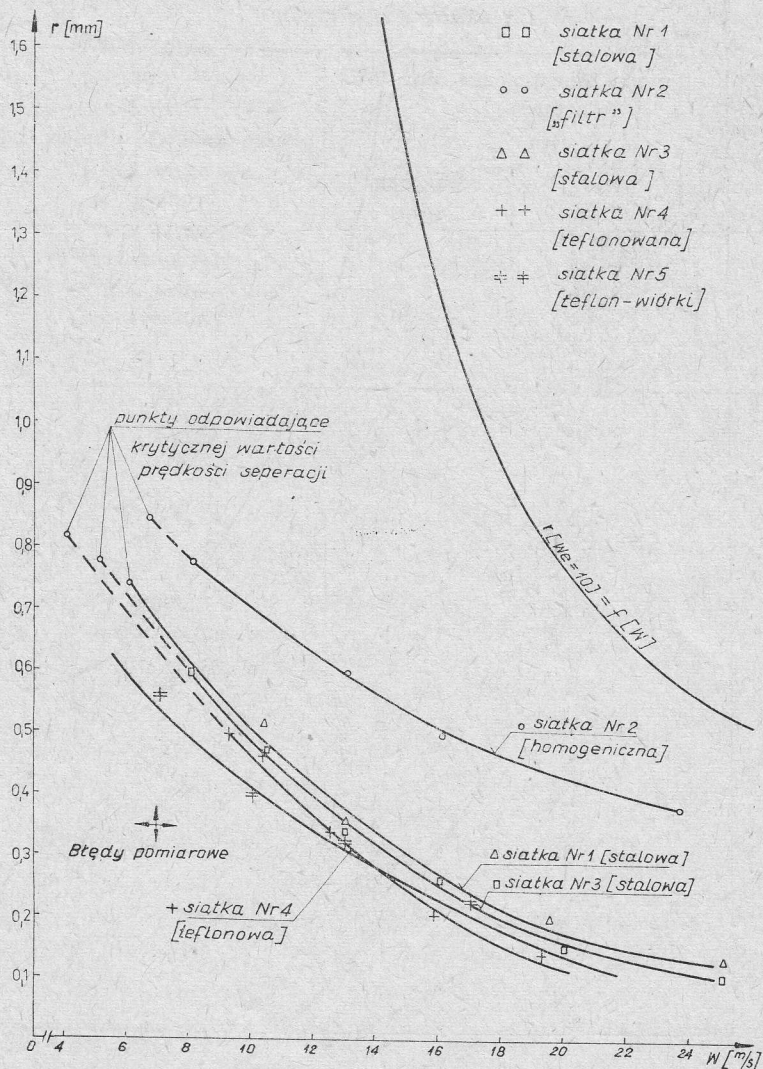


Rys. 12. Przebieg funkcji rozkładu masy kropeł dla siatki stalowej nr 1 (Demister)

Rys. 11. Przebieg funkcji rozkładu ilości kropeł dla siatki stalowej nr 1 (Demister)

Odpowiednio opisane wykresy dla siatki nr 1 znajdują się na rys. 11 i 12, a wykresy zbiorcze przedstawiono na rys. 13 i 14.

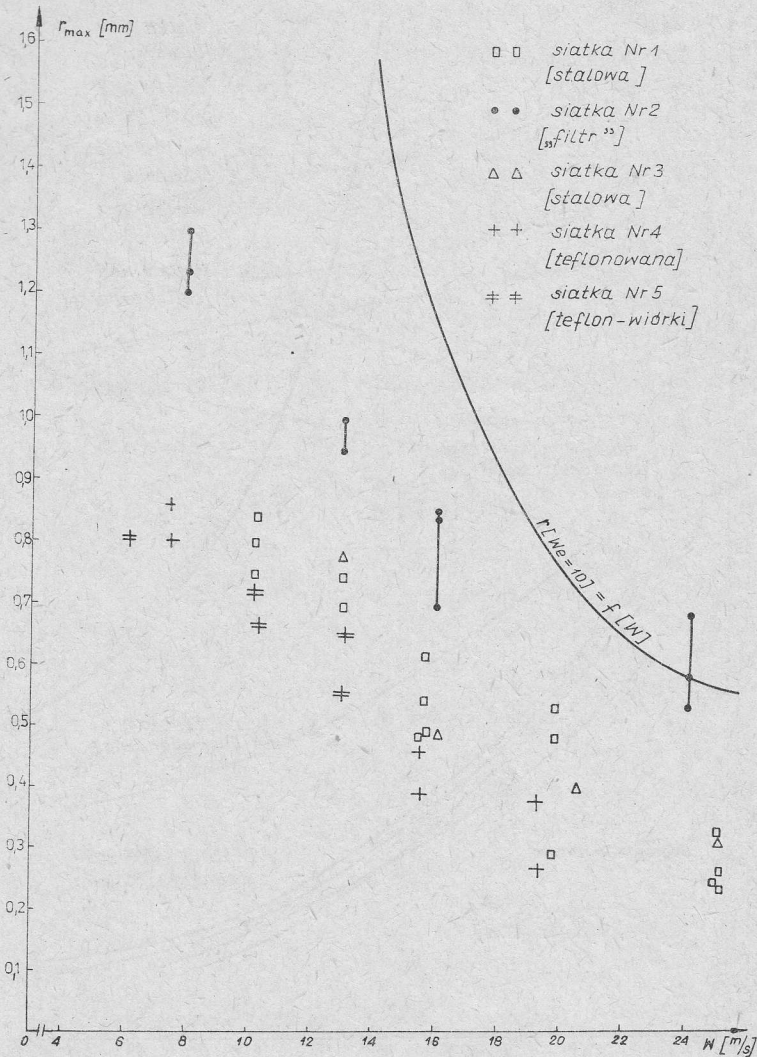
Pomimo dość znacznego rozrzutu punktów, który uwidocznił się np. na rys. 14, można zauważyć pewne typowe tendencje zmiany rozkładu promieni kropel. Z uwagi



Rys. 13. Wykresy promieni kropel odpowiadających maksymalnym wartościom rozkładu masy w funkcji prędkości zrywania dla badanych siatek

na trudność zliczenia kropel drobnych, poniżej 100 μm , trudno jest rejestrować maksimum funkcji rozkładu kropel, szczególnie dla dużych prędkości. W tym przypadku ważniejsza jest jednak informacja dotycząca funkcji rozkładu masy i właśnie jej przebiegi były analizowane przede wszystkim.

Niezależnie od powyższego, w pracy wykonano dla dwóch bliźniaczych siatek, stalowej i teflonowej*), pomiary strat ciśnienia w przepływie suchym i „na mokro”, które przedstawiono na rys. 15. Obecność fazy ciekłej w przepływie powoduje 1,5÷1,8-krotny



Rys. 14. Wartości maksymalnych promieni kropli spotykanych w przepływie za siatkami w funkcji prędkości

wzrost oporów przepływu dla siatki zwilżalnej ze stali i 1,2÷1,5-krotny wzrost dla siatki niezwilżalnej teflonowej, w stosunku do przepływu suchego. Nie stwierdzono natomiast

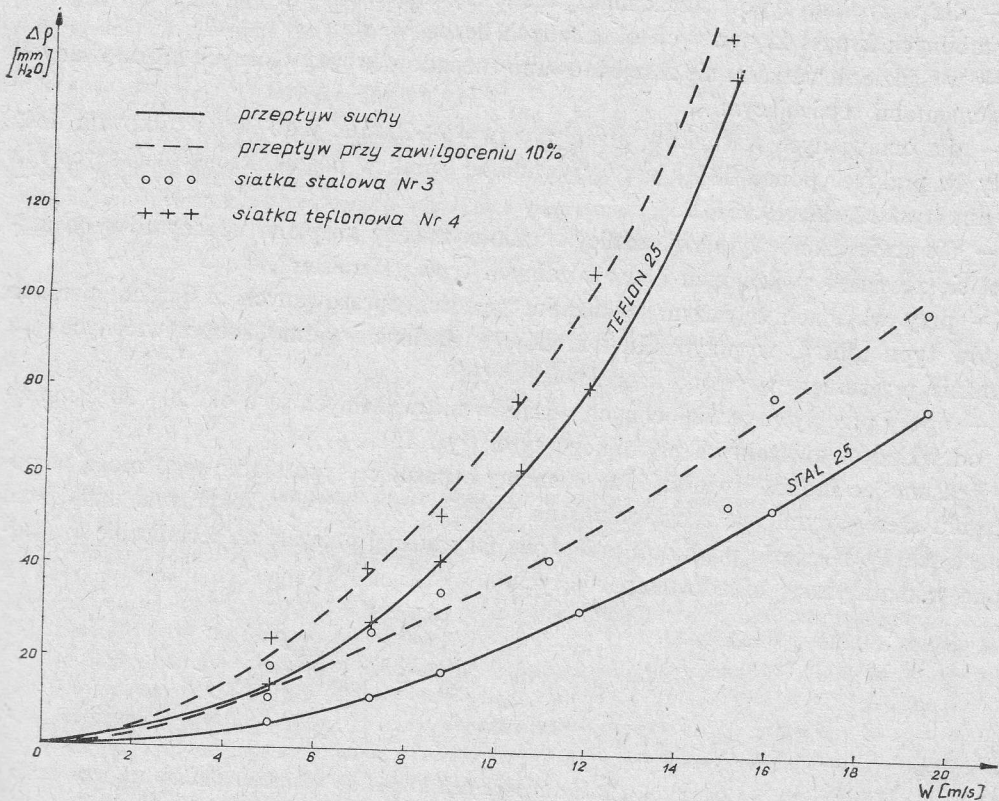
*) Siatki z drutów stalowych pokrywano kilkunastomikrometrową warstwą teflonu.

wpływu wilgotności początkowej $\gamma = 5 \div 20\%$ na opór przepływu, co tłumaczy się stałą zawartością wody w pakiecie uwarunkowaną jego pojemnością. W tabeli 3 zebrano wartości współczynnika ξ badanych siatek.

Tabela 3

Wartości współczynnika ξ

Lp.	Rodzaj siatki	Grubość pakietu	Wartość współczynnika oporu		Wartość współczynnika oporu przepływu wilgotnego odniesiona do przepływu suchego
			$2 \frac{\Delta p}{\rho w^2}$ przepływ suchy	$2 \frac{\Delta p}{\rho w^2}$ przepływ wilgotny	
1	Siatka stalowa nr 3 typ Begg Cousland 3	25	5,12	7,85	1,54
2	Siatka oteflonowana nr 4	25	9	11,2	1,25



Rys. 15. Zmiana oporów przepływu różnych pakietów siatkowych w funkcji prędkości przepływu fazy gazowej $\Delta p = f(w)$

3.2. Ocena błędów pomiarowych

Określenie prędkości przepływu czynnika gazowego, jak już wspomniano, można było wykonać dwiema niezależnymi metodami, za pomocą zwężki i sond pneumatycznych. Porównując otrzymane wyniki i znając dokładności przyrządów pomiarowych (stosowano mikromanometry i manometry typu Askania), błędy oceniono na $\Delta w = \pm 0,15 \div \pm 0,5$ m/s. Błędy przy określeniu stopnia zawilgocenia oceniono na $\delta y = \pm 1 \div 2,5\%$ (błąd względny). Błąd określenia promieni kropeł metodą fotografowania spowodowany jest błędami pomiaru średnic na zdjęciach, nieostrością wynikającą z przesunięcia obrazu kropli w czasie ekspozycji, nieostrością ograniczonej rozdzielczości obiektywu i materiału negatywnego, a głównie niezerową grubością warstwy kropeł za siatką. Błąd ten oceniono na $\Delta r = \pm 15 \div 20$ μm .

4. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników, a także bezpośredniej obserwacji stwierdzono że:

- dla wszystkich typów siatek maksymalne zrywające się krople wtórne są mniejsze od stabilnych kropeł krytycznych określonych liczbą Webera ($We = 10$),
- w śladzie za siatkami nie zarejestrowano rozpadów kropeł wtórnych uformowanych za elementami separującymi,
- dla omawianych warunków przepływu ($w = 5 \div 30$ m/s, y do 30%) całkowita ilość wody (w praktyce ponad 98%) jest wrywana ze siatek w postaci kropeł większych niż 100 μm (rys. 12, 17, 19, 21, 23),
- nie stwierdzono wyraźnej różnicy wielkości między kroplami wtórnymi wrywającymi się ze siatek zwilżalnych i niezwilżalnych typu „Demister”,
- przy wkładach o dużym wskaźniku gęstości, sprasowanych z bardzo cienkich drutów typu „filtr”, w przypadku wkładów zwilżalnych widmo kropeł wtórnych jest wyraźnie przesunięte w stronę kropeł większych,
- opory przepływu zawilgoconych wkładów niezwilżalnych są o ok. 20 - 30% mniejsze od wkładów zwilżalnych podobnego typu (rys. 15).

Reasumując można stwierdzić, że elementy separujące typu siatkowego mogą w połączeniu szeregowym, np. z cyklonami na wyjściu, tworzyć wysokosprawne urządzenia separujące. Podniesienie prędkości przepływu fazy nośnej pozwala na technicznie uzasadnioną miniaturyzację układów separujących.

Praca wpłynęła do Redakcji w maju 1977 r.

Literatura

- [1] A. Gardzilewicz, S. Zarzycki, *Badania separacji kropeł na wkładach siatkowych w mieszaninie wodno-powietrznej*. Oprac. wewn. IMP PAN, 1972.
- [2] S. Krzeczowski, *Wstępne wyniki badania ruchu kropeł w przepływie przed przeszkodą cylindryczną*. Prace IMP, z. 40, 1968.

- [3] R. Puzyrewski, J. Wełnic, *Teoretyczne obliczenia procesu separacji fazy ciekłej pary wodnej w separatorach typu falistego*. Oprac. wewn. IMP PAN 44/70, nr 8, 1971.
- [4] Katalog firmy Vereinigte Füllkörper Fabriken (RFN).
- [5] Katalog firmy Begg Cousland (Wielka Brytania).
- [6] E. Blass, *Geometrische und strömungstechnische Untersuchungen an Drahtgeweben*. Chemie Ing. Techn., 7/36, 1968.
- [7] S. Marcinkowski, S. Krzeczowski, R. Jasiński, *Sonda igłowa*. Biuletyn IMP-PAN nr 118/792/1975.
- [8] M. Kerker, *The scattering of light*. Academic Press, New York 1969.
- [9] A. D. Zimon, *Adgiezija židkosti i smacziwanije*. Chimija, 1974.
- [10] A. H. Ellison, W. A. Zisman, *Wettability studies of nylon, polyethylene, terephthalato and polystyrene*. J. Physical Chemistry, v. 58, 1954.
- [11] J. Mack, J. Physical Chemistry, v. 40, 1936.

Спектр капель за сепарирующими элементами различной смачиваемости

Резюме

Инертная сепарация рассеянной жидкой фазы в газовой среде осуществляется обычно при помощи сетки или жалюзи. Такие элементы работают в условиях многих ограничений. Наиболее истинным является потеря устойчивости жидкости, высепарированной на элементах сепаратора, и ее поворот к течению при скоростях часто называемых критическими. Ограничение скорости затрудняет осуществление сепарации мелкодисперсных смесей, так как эффективность инертной сепарации растет со скоростью жидкой фазы.

В работе представлены результаты исследований спектра капель срывающихся с сеточных сепарирующих элементов в пределах скорости, прекращающих критические значения (см. рис. 4 - 10, а также функции распределения размеров капель и их массы, рис. 11 - 14). В таких пределах работы сепарирующие элементы исполняют роль коагулирующих элементов, принимаемых в качестве вступительных сепараторов, представляющих например простой жалюзийный сепаратор.

Droplet Spectrum Behind Separating Components of Various Wettabilities

Summary

Inertial separation of the liquid phase dispersed in a gaseous medium is usually effected with the aid of a grid or shutter. The operation of such components is subject to numerous limitations. The most essential of them consists in de-stabilization of the liquid separated on the liquid separator components, resulting in the liquid returning to the flow at velocities often called the critical velocities. The velocity limit makes it difficult to separate finely dispersed mixtures, as the efficiency of inertial separation increases with the gaseous phase velocity.

The paper presents results of investigations of the spectrum of droplets detaching from separating grid components in the velocity range exceeding the critical values (see Figs. 4 ÷ 10, and the size and mass of droplets functions, Figs. 11 ÷ 14). Separating components can be regarded in such a range of operating conditions as coagulating components suitable for using as preliminary components of separators, e.g. in front of a simple shutter separator.