

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

75

WARSZAWA—POZNAN 1978

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPIYWOWYCH

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

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1978

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 370+90 egz.	Oddano do składania 13 VII 1977 r.
Ark. wyd. 14. Ark. druk. 11,25	Podpisano do druku 22 maja 1978 r.
Papier druk. mat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w maju 1978 r.
Nr zam. 761/58	Cena zł 45,— J-7/292

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. Mickiewicza w Poznaniu

ANDRZEJ GARDZILEWICZ, STEFAN KRZECZKOWSKI

Gdańsk

Mechanizm osiadania i zrywania kropeł wtórnych na elementach separatorów siatkowych typu pionowego różnej zwilżalności*

W pracy opisano badania eksperymentalne wydzielonego elementu separującego w postaci płaskiego oczka siatki, wykonanego z materiałów zwilżalnych i niezwilżalnych, w celu określenia charakterystycznych czasów przejścia przez nie kropeł.

1. Wprowadzenie

Przepływ dwufazowy polidispersyjnej fazy ciekłej i gazu przez siatki rozbić można na trzy etapy. Pierwszy etap to osiadanie drobnych kropeł (pierwotnych) na elementach siatki, drugi to tworzenie się i spływ fazy ciekłej po drutach i wreszcie trzeci etap to zrywanie się cieczy z drutów (krople wtórne). Proces przepływu przez siatkę badano głównie w zastosowaniu do rozdziału faz. Większość dotychczasowych prac traktuje to zjawisko globalnie. Poszukuje się przy tym najbardziej efektywnych pod względem separacji elementów siatkowych dla różnych parametrów i różnych mieszanin dwufazowych. Badania fizyki omawianych zjawisk na siatkach sprowadzały się głównie do etapu pierwszego, tzn. najczęściej określano współczynniki osiadania i separacji [1, 2]. W aspekcie technicznym ważny jest jednakże nie tylko proces rozdziału (etap I), ale także transport na zewnątrz wyseparowanej, grubokropłowej fazy ciekłej (etap II) oraz efekty zrywania (etap III). Wyżej wymienione czynniki nie tylko wpływają na całkowitą efektywność separacji, ale decydują o oporach przepływu przez siatkę.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań przenikania kropeł wtórnych przez wydrebniony, pojedynczy element separatora siatkowego. Autorów szczególnie interesował mechanizm tego „przenikania” oraz niektóre charakterystyczne czasy przejścia kropli przez druty, wykonane z materiałów o różnej zwilżalności. Genezą badań był, zaobserwowany wcześniej przez autorów, wyraźny wpływ zwilżalności na opory przepływu siatkowych wkładów separujących [3], potwierdzany też przez informacje katalogowe firmy Begg Cousland.

2. Opis stoiska badawczego i techniki pomiarowej

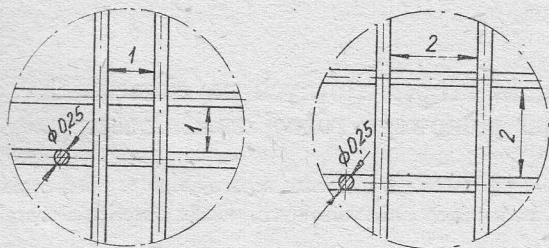
Wydrebniony element separujący w postaci oczka siatki pokazano na rys. 1. Jego wielkość, a także rozmiar średnic drutów są zbliżone do powszechnie stosowanych siatek typu „demister” firmy Begg Cousland (Wielka Brytania) oraz V. F. F. Vereinigte (RFN)**.

Element separujący ustawiono pod kątem 45° w strumieniu powietrza podawanego

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

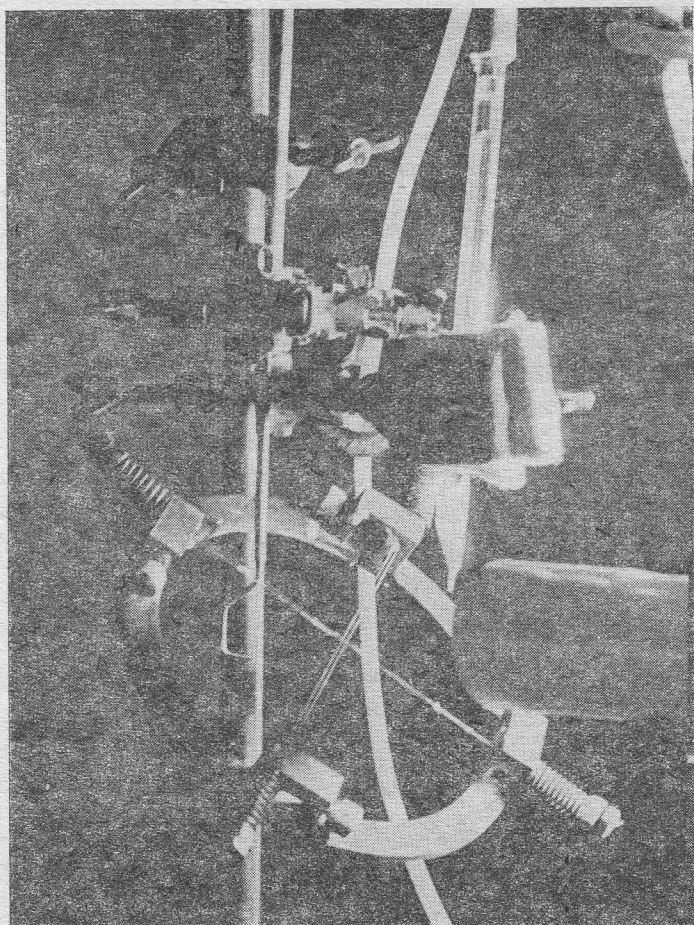
** Dla prostoty eksperymentu badany element siatki był typu „tkanego”, podczas gdy demistery są typu „dzianego”.

z wentylatora. Krople wody podawano na element za pomocą cienkiej kapilary. Stoisko przedstawia rys. 2. Prędkość powietrza można było zmieniać w granicach od $0 \div 10$ m/s, co odpowiada parametrom pracy takich elementów. Odpowiedni pomiar wykonano za



Rys. 1. Schematyczny rysunek oczka siatki (podziałka 10 : 1)

pomocą sondy Prandtla. Krople wody generowano grawitacyjnie za pomocą stalagmometru. Średnice kropeł wynosiły $2,5 \div 3,5$ mm. Wielkość ta odpowiada kroplom wtórnym obserwowanym w przepływie mieszaniny powietrzno-wodnej na wyżej wymienionych



Rys. 2. Stoisko badawcze

siatkach. Mechanizm zjawiska osiadania i zrywania kropeł na drutach rejestrowano dwiema metodami: kinematograficzną i fotograficzną.

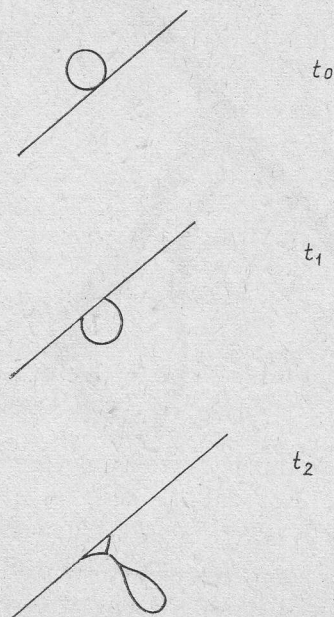
Metoda kinematograficzna. Zdjęcia kinematograficzne wykonano przy użyciu kamery Pentazet 16. Zastosowano częstość filmowania 1000 i 2000 kadrów/s, odwzorowanie relacji przedmiot-negatyw w skali 1 : 2. W badaniach wykorzystano film ORWO NP-7 o czułości 27 DIN; zastosowano przesłonę 1 : 22, przy oświetleniu lampą kinową o mocy 3 kW, system podświetlania — matówkowy (zdjęcia sylwetkowe).

Metoda fotograficzna. Do badań zastosowano metodę fotograficzną z błyskiem [4]. Proces rejestrowano aparatem fotograficznym przy lampie błyskowej. Dane aparatu: lustrzany, małoobrazkowy typu Praktina FX, o obiektywie Sonnar 2,8/180 firmy Zeiss Jena. Dane lampy: firma RFT (typ Funkenblitzgerät FG 1), światłość błysku $1,5 \cdot 10^6$ cd, czas trwania błysku $1,5 \cdot 10^{-6}$ s. Kropla dobiegając do elementu separującego przecinała laserową ścieżkę świetlną, wyzwalając impuls fotodiody. Po zadanym czasie od tego impulsu, urządzenie sterujące wyzwalало błysk lampy iskrowej, dając możliwość sfotografowania procesu w określonym czasie od chwili początkowej. Dzięki temu, za pomocą kolejnych zdjęć, uzyskano obrazy wszystkich interesujących stadiów zrywania się kropli z elementu separującego.

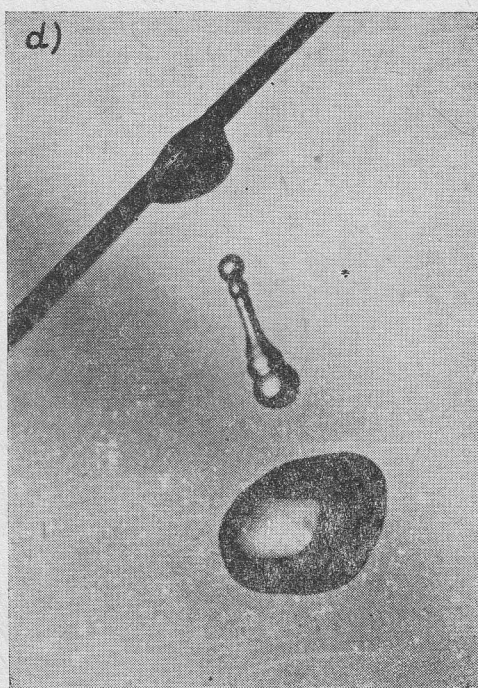
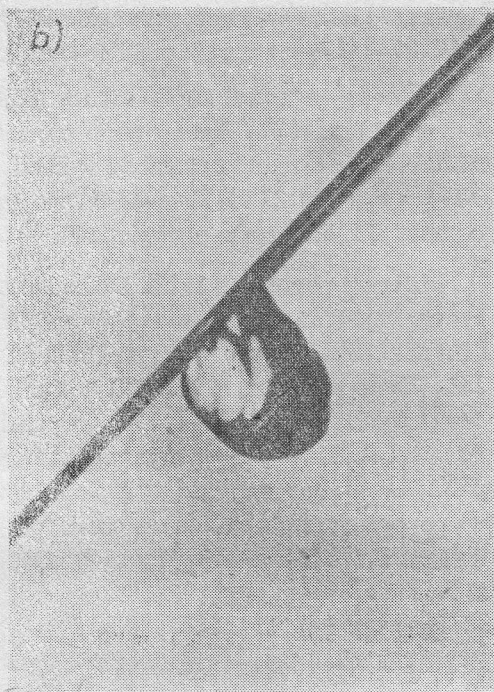
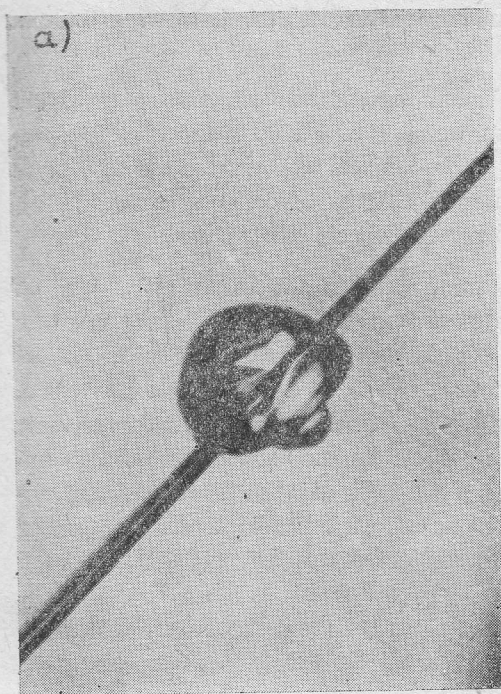
Pierwsza metoda była wygodniejsza w tych pomiarach dla rejestracji czasów charakterystycznych, druga dawała znacznie lepsze technicznie zdjęcia — obie więc uzupełniały się.

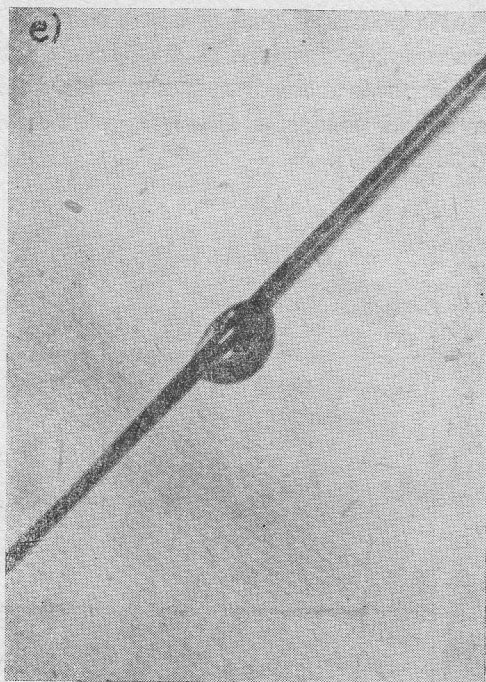
3. Rezultaty badań

Badania eksperymentalne wykonano dla typowych drutów siatek separujących o średnicach $\varnothing = 0,25$ mm, przyjmując moduł siatki 1 i 2 mm. Średnice kropeł atakujących były zatem większe niż moduł. Prędkość fazy nośnej wynosiła alternatywnie 5 i 10 m/s.



Rys. 3: Charakterystyczne momenty przejścia kropli przez oczko siatki





Rys. 4. Fotografie różnych stadiów przejścia kropli przez oczko siatki stalowej ($\varnothing = 0,25$, moduł 1×1 mm, $w = 5$ m/s); a) $t = 0,979$ ms, b) $t = 11,95$ ms, c) $t = 20,02$ ms, d) $t = 33,456$ ms, e) $t = 40,43$ ms

Badano mechanizm osiadania i zrywania na drutach stalowych (materiał zwilżalny) oraz na drutach pokrytych powłokami silikonowymi i teflonowymi (materiały niezwilżalne). Dla scharakteryzowania kinematyki przejścia kropli przez element separujący wyróżniono następujące momenty charakterystyczne (rys. 3 i 4):

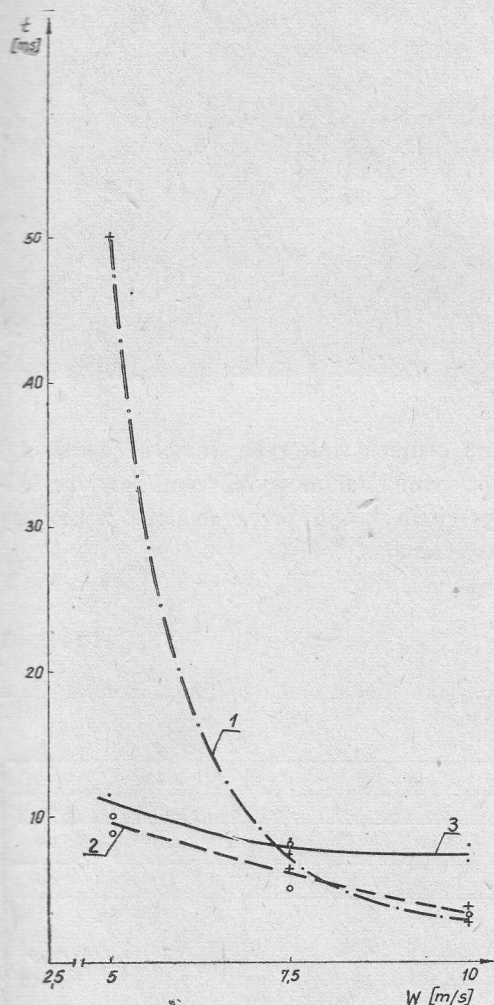
Tabela 1

Czasy charakterystyczne przejścia kropli przez oczko siatki. Moduł oczka 2×2 mm, średnica drutu $\varnothing = 0,25$ mm

Materiał		Stal			Silikon			Teflon		
Prędkość gazu		5	7,5	10	5	7,5	10	5	7,5	10
Czasy charak- teryst.	t_1 [ms]	$10 \div 11,5$	$7,5 \div 8,5$	$7 \div 8$	$9 \div 10$	$5 \div 8$	3	50	$6,5 \div 7,5$	$3 \div 4$
	t_2 [ms]	$30,5 \div 33$	$20 \div 23$	$17 \div 20$	$36 \div 41$	$20 \div 21$	$11 \div 12$	$125 \div 144$	$13 \div 14$	$8 \div 9$
Forma przejścia		warkocz ze stopką			warkocz ze stopką	rozpad kropli, na oczku brak błonki		piłeczkowa	rozpad na krople, warkocze podwójne i potrójne bez stopki	warkocz kropłowy

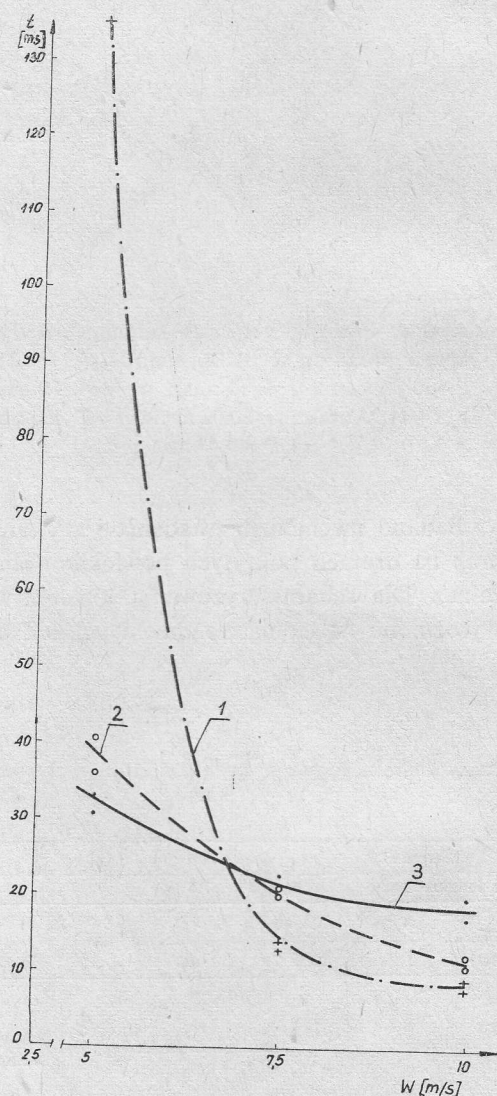
- a) zetknięcie się kropli z oczkiem siatki, które uznane jest za początek procesu $t_0 = 0$,
- b) przeniknięcie kropli na drugą stronę elementu separującego ($t_1 - t_0$),
- c) oddzielenie się kropli od elementu separującego ($t_2 - t_0$).

Na podstawie analizy taśm filmowych oraz zdjęć fotograficznych określano, zdefiniowane wyżej, czasy charakterystyczne dla kilku parametrów oraz różnych sposobów zwilżania powierzchni drutu przez wodę. Warunki pomiaru i rezultaty ujmują tabele 1 i 2, a wyniki pomiarów dla wyżej wymienionych warunków przedstawiono na wykresach (rys. 5, 6, 7).



Rys. 5. Wykresy charakterystycznych czasów przejścia kropli przez oczko siatki o różnej zwilżalności w funkcji prędkości przepływu ($\varnothing = 0,25$, moduł oczka 2×2 mm)

1 - teflon, 2 - silikon, 3 - stal



Rys. 6. Wykresy charakterystycznych czasów przejścia kropli przez oczko siatki o różnej zwilżalności w funkcji prędkości przepływu ($\varnothing = 0,25$, moduł oczka 1×1 mm)

1 - teflon, 2 - silikon, 3 - stal

Tabela 2

Czasy charakterystyczne przejścia kropli przez oczko siatki. Moduł oczka 1×1 mm, średnica drutu $\varnothing = 0,25$ mm

Materiał		Stal			Silikon			Teflon		
Prędkość gazu		5	7,5	10	5	7,5	10	5	7,5	10
Czasy charak- teryst.	t_1 [ms]	12 ÷ 13	8 ÷ 9	6 ÷ 8	9 ÷ 10	8 ÷ 10	4 ÷ 6	15 ÷ 27,5	9	4 ÷ 5
	t_2 [ms]	31 ÷ 36	27 ÷ 30	18 ÷ 19	30 ÷ 31	27 ÷ 43	12	33 ÷ 67	30	11 ÷ 13
Forma przejścia		Warkocze z pojedynczą lub podwójną formą oraz ze stopką			Warkocz ze stopką	Rozpad na krople, podwójne warkocze		Pięczo- we; wisi kropla pierwotna	Warkocze kropłowe, (czasami kropla pierwotna)	

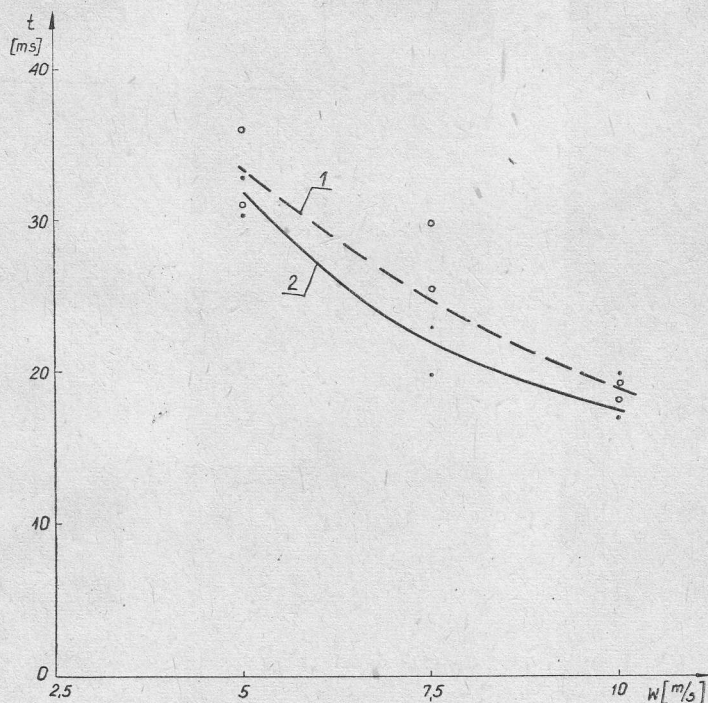
Jak widać, dla warunków eksperymentu czasy te wahają się w granicach:

– materiały zwilżalne, przy przejściu typu „warkoczowego”

$$t_1 = 6 \div 13 \text{ ms}, \quad t_2 = 15 \div 33 \text{ ms},$$

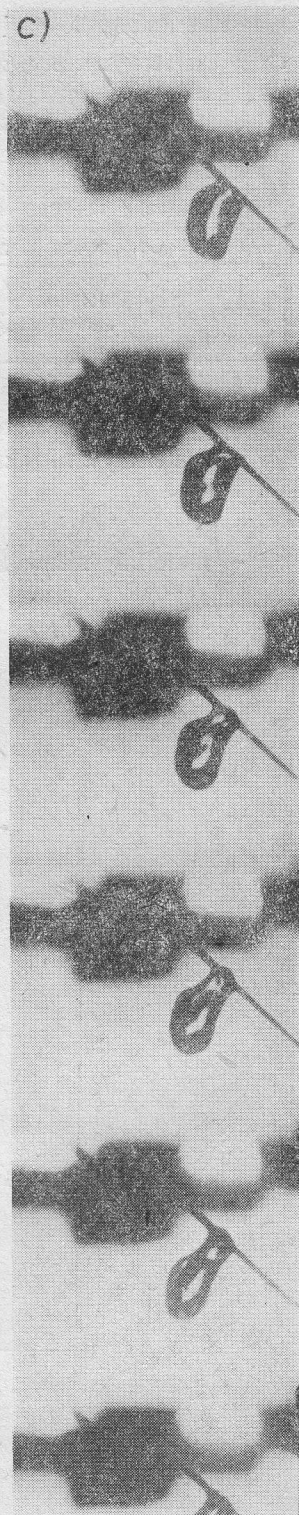
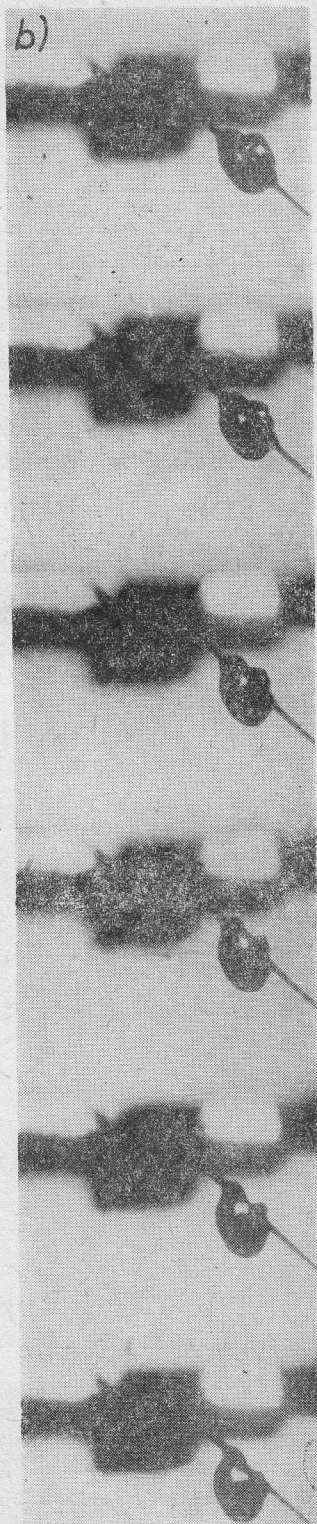
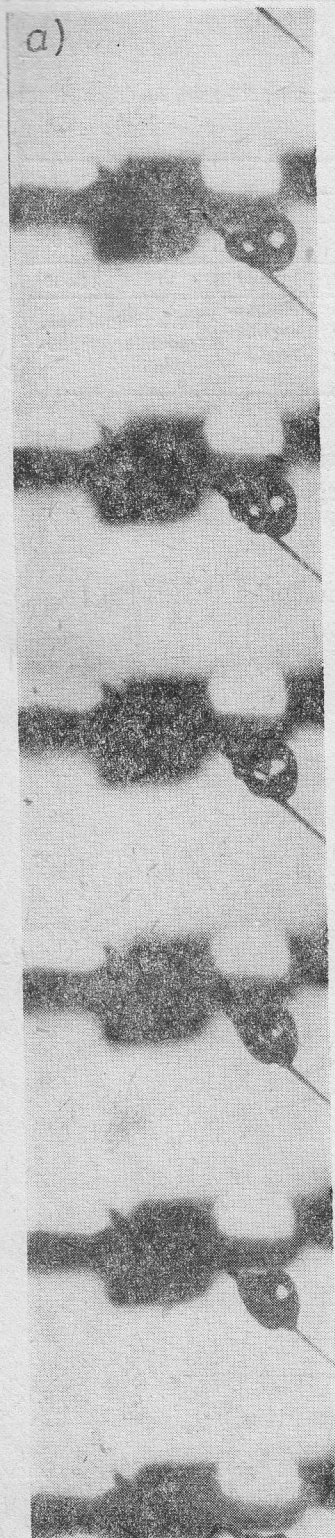
– materiały niezwilżalne, przy przejściu typu „warkoczowego”

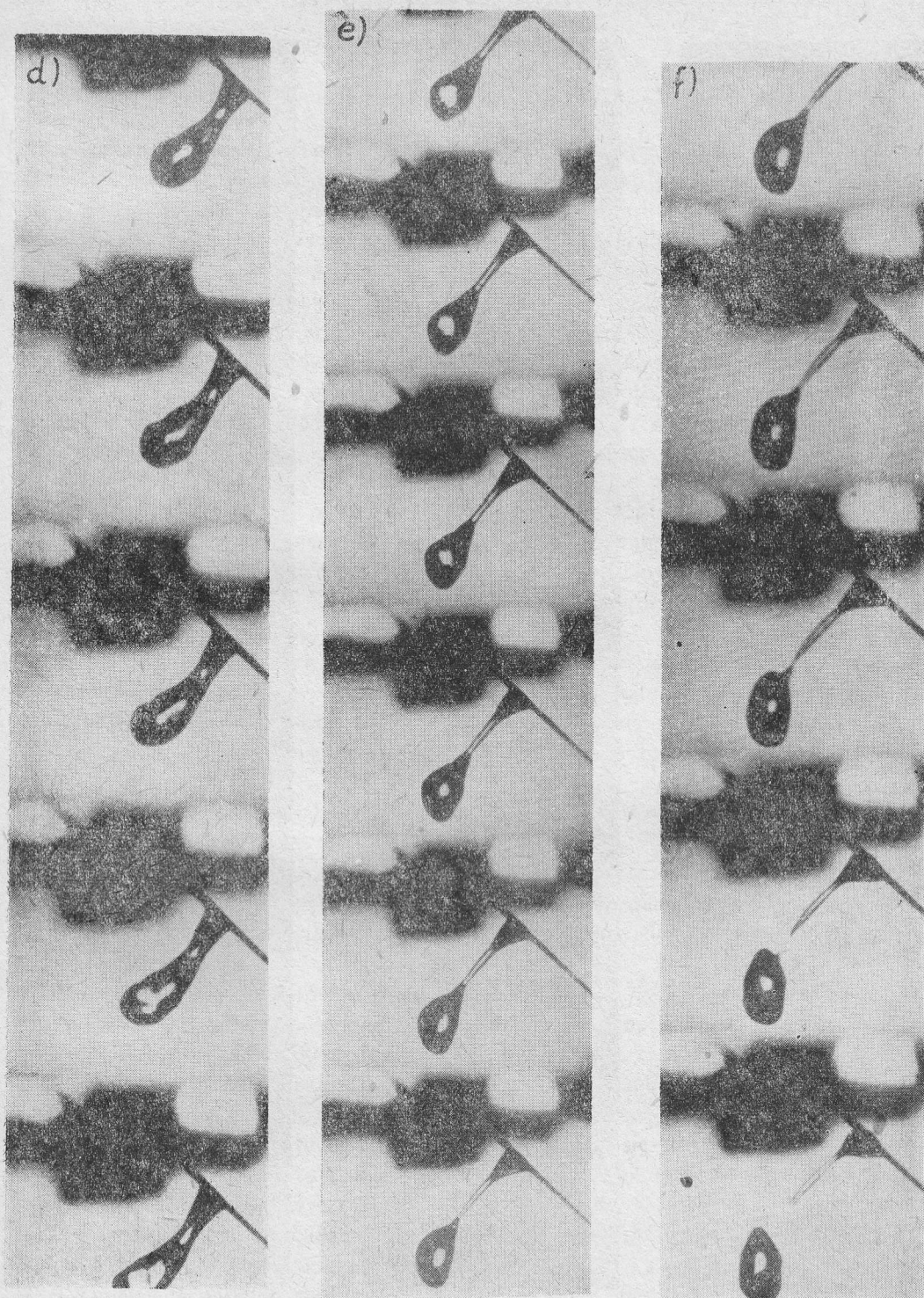
$$t_1 = 3 \div 10 \text{ ms}, \quad t_2 = 8 \div 30 \text{ ms}$$



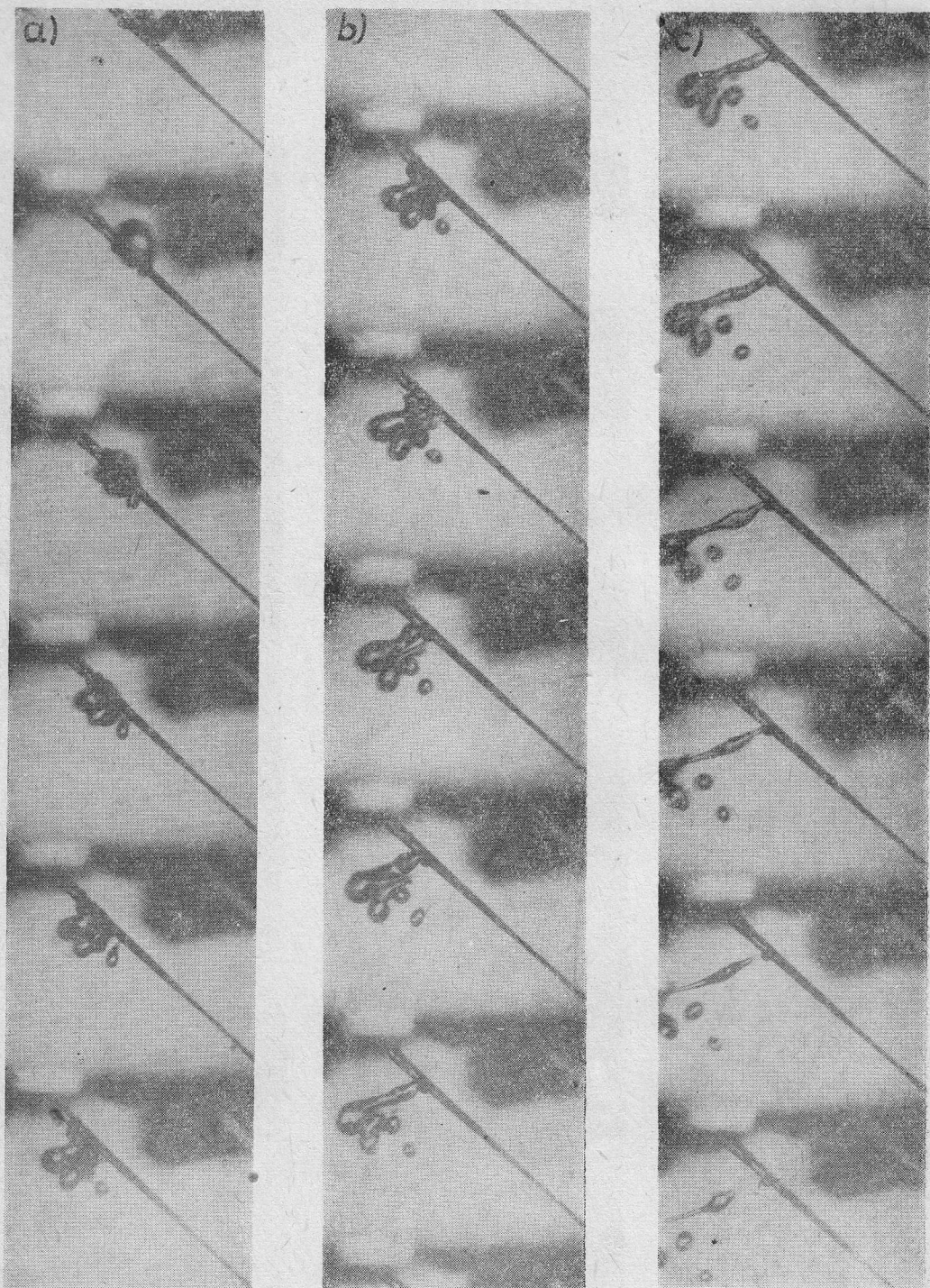
Rys. 7. Porównanie czasów charakterystycznych przepływu w funkcji prędkości dla stalowego oczka o zmiennym module

1 – moduł 1×1 mm, 2 – moduł 2×2 mm





Rys. 8. Kinogram przejścia kropli przez oczko stalowe ($\varnothing = 0,25$, moduł 2×2 mm, prędkość przepływu 10 m/s, szybkość filmowania 2000 kl/s, czas przejścia 18 ms)



Rys. 9. Kinogram przejścia kropli przez oczko teflonowe ($\varnothing=0,25$, moduł 2×2 mm, prędkość przepływu 10 m/s, szybkość filmowania 2000 kl/s, czas przejścia 8 ms)

lub przy przejściu typu „piłeczkowego”*)

$$t_1 = 15 \div 50 \text{ ms}, \quad t_2 = 33 \div 144 \text{ ms}.$$

Analiza zarejestrowanych przebiegów pozwala uchwycić wyraźne różnice w mechanizmie przejścia kropeł dla zwilżalnych i niezwilżalnych powierzchni. Uwidaczniają to sekwencje filmowe przedstawione na rys. 8, 9 i 10. Przy zwilżalnych drutach siatki przejście kropli kończy się zerwaniem warkocza i pozostawieniem kropli szczątkowej, powstałej z charakterystycznej stopki, która tworzy się na powierzchniach drutu (rys. 4). Przy drutach niezwilżalnych sytuacja komplikuje się. Nie we wszystkich przypadkach rejestruje się na drutach krople szczątkowe. Krople te nie tworzą charakterystycznej błonki, ale formy ich są kuliste. Występują sporadycznie przy małych prędkościach. Proces zrywania się kropeł przebiega szybciej niż przy zwilżalnych powierzchniach. Należy podkreślić, że dzieje się tak tylko dla większych prędkości ($> 6 \text{ m/s}$) przepływu fazy gazowej. Krople zrywające się z drutów są drobniejsze, a kropla padająca na element separujący zwykle się rozpada (rys. 9). Wymienione efekty spowodowane są zanikiem lub wręcz brakiem sił adhezji, które stabilizują krople na powierzchniach zwilżalnych. Krótsze czasy przejścia kropeł w przypadku powierzchni niezwilżalnych dają się łatwo wytłumaczyć. Z rys. 8 i 9 wynika, że średnice warkocza są mniejsze dla powierzchni niezwilżalnych niż zwilżalnych, a siły napięcia powierzchniowego, hamujące przepływ, są proporcjonalne do obwodów zbudowanych na tych średnicach.

Przy małych prędkościach fazy gazowej efekt niezwilżalności ma przeciwny wpływ na czasy przejścia. Staje się on wyraźnie dłuższy, a mechanizm samego przejścia jest odmienny. Dla odróżnienia nazwano go „piłeczkowym”. Kropla w postaci kulki blokuje się w oczku siatki i wolno przez nie przenika. Pokazuje to kinogram (niepełny) na rys. 10.

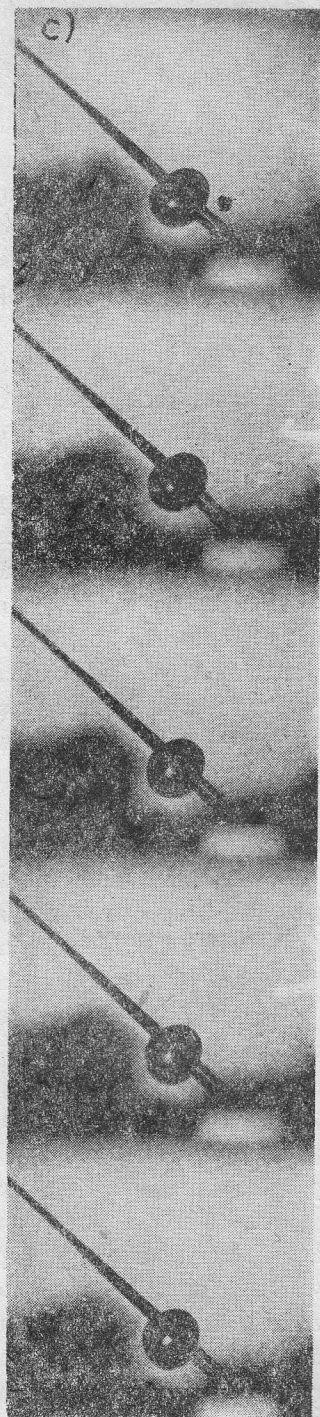
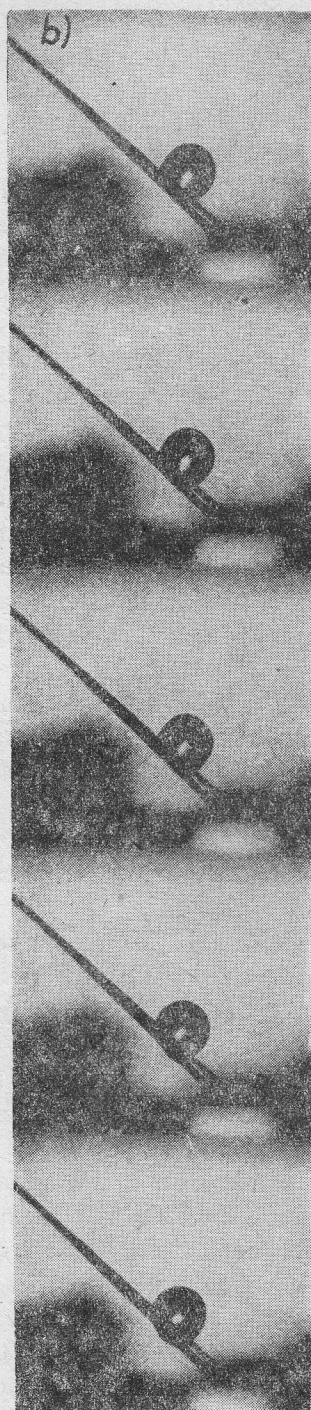
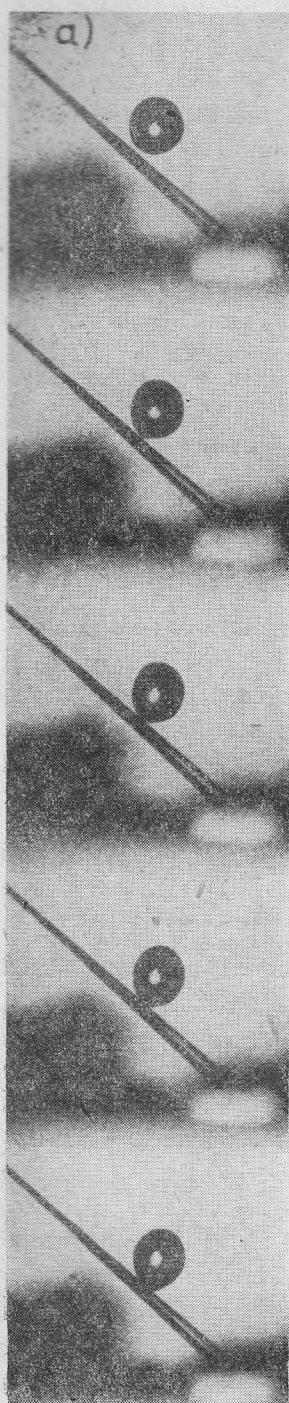
Reasumując, dla powierzchni niezwilżalnych można rozróżnić trzy rodzaje mechanizmu przejścia kropli przez oczka siatki:

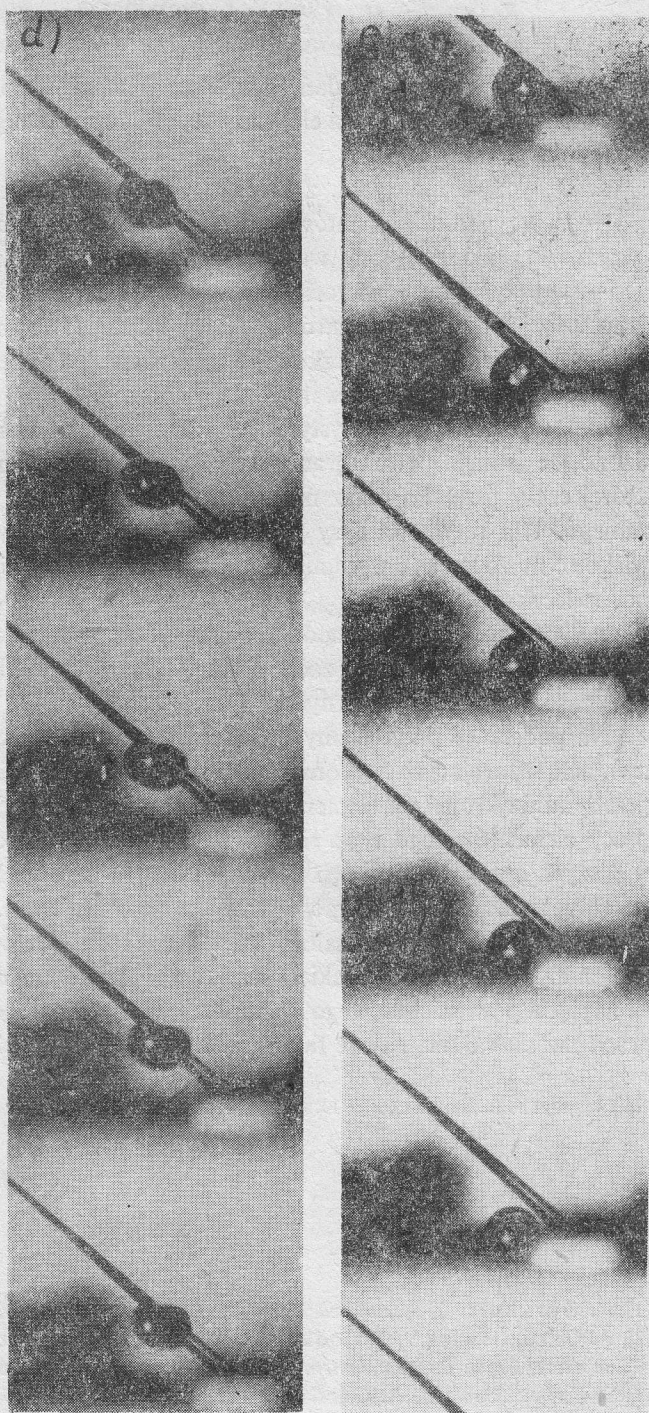
- przejście z formowaniem charakterystycznego warkocza,
- przejście kropli z warkoczem, ale uprzednim jej rozpadem na drutach,
- przejście kropli w postaci integralnej kulki, charakteryzującej się znacznie dłuższym czasem trwania procesu

Uzyskane wyniki pomiarów przedstawione na rys. 5, 6 i 7 wskazują na pewien rozrzut wynikający z niepowtarzalności warunków eksperymentu (np. nieco inny sposób nabiegania kropli na oczko siatki itp.). Niemniej, rejestrowane czasy charakterystyczne dla procesów przejścia kropeł różnią się nieznacznie, w granicach $10 \div 15\%$.

Przekroczenie podanych wartości wynikało z odmiennego mechanizmu przejścia kropli. Przykładowo, przy przejściu kropli z rozrywaniem się na dwu- lub trójczołowe warkocz (rys. 9). Również zmieniając moduły oczek siatki z 1 na 2 mm odnotowano małe zmiany czasów charakterystycznych. Są one podobne przy stosowaniu różnego rodzaju drutów tworzących oczko badanej siatki (tab. 1, 2 i rys. 7). Omawiane rozbieżności zarejestrowanych czasów charakterystycznych wahają się średnio w granicach 10% i wzrastają wraz z maleniem modułu siatki.

*) Przypomina to przejście piłki tenisowej przez siatkę, stąd nazwa.





Rys. 10. Częściowy kinogram przejścia kropli przez oczko teflonowe ($\varnothing = 0,25$, moduł 2×2 mm, prędkość przepływu 5 m/s, szybkość filmowania 1000 kl/s); a) czas 0 - 5 ms, b) 32 - 36 ms, c) 51 - 55 ms, d) 85 - 89 ms, e) 118 - 122 ms

4. Wnioski

Reasumując wyniki badań, dotyczących mechanizmu osiadania i zrywania (a ściślej przechodzenia) kropeł przez elementy separujące o różnej zwilżalności, można przedstawić następujące wnioski.

a. Dotyczące materiału, z którego wykonano elementy separujące:

– w przypadku elementów zwilżalnych kropła badanej cieczy przechodzi przez siatkę, tworząc charakterystyczny warkocz ze stopką (rys. 8),

– w przypadku powierzchni niezwilżalnych mechanizm przejścia zależy od prędkości fazy nośnej i różni się zarówno formy warkoczowe pojedyncze lub wielokrotne (rys. 9), jak też przejścia typu piłeczkowego, polegające na przenikaniu kropli przez oczko przy nieznacznej deformacji (rys. 10).

b. Dotyczące charakterystycznych czasów przejścia przez element separujący – stwierdzono, że istnieje pewna graniczna prędkość przepływu fazy nośnej (gazowej), powyżej której czasy przejścia przez niezwilżalny element oczka są niższe niż dla elementu zwilżalnego. Dla prędkości fazy nośnej mniejszej od krytycznej efekt jest przeciwny. Zjawisko to może znaleźć wytłumaczenie w zmianie mechanizmu przejścia z „warkoczowego” na „piłeczkowy”.

c. Dotyczące zmiany modułu oczka siatki – stwierdzono, że zmniejszenie modułu oczka siatki powoduje, przy zachowaniu tych samych wielkości kropeł, nieznaczne zwiększenie czasów charakterystycznych.

Na podstawie przytoczonych danych wykazano, że czasy przebywania kropeł na elementach separujących wykonanych z materiałów niezwilżalnych, są mniejsze od czasów przebywania kropeł na elementach zwilżalnych, przy prędkości odpowiadającej zakresom pracy elementów tego typu siatek. Fakt ten stanowi pewne wyjaśnienie rejestrowanych większych oporów przepływu mieszanin krople-gazowych na siatkach wykonanych z materiałów zwilżalnych [1] w porównaniu z niezwilżalnymi. Dla pełniejszej informacji dotyczącej strat przepływu należałoby jednak przebadać przestrzenne zespoły takich elementów wykonanych z wycinków pakietu siatkowego, gdzie można by obserwować współdziałanie sił napięcia powierzchniowego z siłami tarcia i oporu aerodynamicznego. W tym kontekście praca ma charakter jedynie faktyczny.

Praca wpłynęła do Redakcji w czerwcu 1976 r.

Literatura

- [1] A. Bürkholz, *Tropfenabscheidung an Drahtfiltern*. Chemie Ing. Techn. 42/1971/21.
- [2] A. Gardzilewicz, J. Kołodko, *Analiza procesu separacji na siatkach w przepływach dwufazowych ze szczególnym uwzględnieniem dyfuzji turbulentnej*. Oprac. wewn. IMP PAN nr 227/1974.
- [3] S. Krzeczkowski, A. Gardzilewicz, *Widmo kropeł za elementami separującymi różnej zwilżalności*. Oprac. wewn. IMP PAN nr 187/1974.
- [4] S. Krzeczkowski, L. Bitel, *Wstępne badania eksperymentalne dynamiki rozpadu kropeł w przepływie gazu*. Oprac. wewn. IMP PAN nr 145/1973.

**Механизм осаждения и срыва вторичных капель на элементах
сеточных сепараторов вертикального типа различной
смачиваемости**

Резюме

Произведены экспериментальные исследования перехода водяных капель через сепарирующий элемент в виде плоской ячейки сетки (рис. 1), при течении воздуха. С целью определения кинематики перехода через элемент, различаются характеристические времена (рис. 3 и 4). На основании анализа фильмовых лент и фотоснимков (рис. 8 ÷ 10) определяются эти времена и формы переходов капли через ячейку различной смачиваемости (рис. 5 ÷ 7).

**Mechanism of Settling and Tearing Off Secondary Droplets on Components of Vertical
Grid Separators Having Various Wettabilities**

Summary

The paper concerns experimental investigations of the passage of water droplets through a separating element having the form of flat grid mesh (Fig. 1). The investigations have been carried out for an air flow. Characteristic times have been defined in order to characterize the kinematics of the passage through the element (Figs 3 and 4). These times have been determined basing on an analysis of films and photographs (Figs 8-10). Also the form of the passage of a droplet through a mesh of various wettability has been determined (Figs 5 - 7).