

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, JERZY KOŁODKO

Gdańsk

Analiza procesu separacji na siatkach w przepływach dwufazowych*

W pracy przedstawiono obliczenia zdolności separacyjnej pakietów siatkowych dla przepływów drobnych kropelek (0,1 - 10 μm) w gazie. Zbadano w szczególności bezwładnościowy i dyfuzyjny efekt separacji.

Spis oznaczeń

a – rozmiar oczka siatki,	S – stosunek powierzchni,
A – powierzchnia,	t – czas,
b – odległość rzędów w siatce,	T – temperatura,
B – współczynnik we wzorze (4.6),	w – prędkość,
C_D – współczynnik oporu,	x – współrzędna w układzie kartezjańskim,
d – średnica kropki,	y – współrzędna w układzie kartezjańskim oraz wilgotność,
D – współczynnik dyfuzji,	z – liczba rzędów w siatce,
h – wymiar poprzeczny siatki,	β – współczynnik przejmowania masy,
j – gęstość strumienia kropel,	ΔJ – przyrost strumienia kropel,
J – strumień kropel,	Δb – przyrost wzdłuż długości siatki,
l – wymiar liniowy,	Δn – przyrost koncentracji,
L – długość cylindra,	η – sprawność,
n – koncentracja masowa kropel,	ρ – gęstość,
p – ciśnienie,	ν – kinetyczny współczynnik lepkości,
r – promień kropki,	ξ – współczynnik osiadania.
R – promień cylindra,	

Kryterialne liczby podobieństwa

Nu – liczba Nusselta,	Sc – liczba Schmidta,
Pr – liczba Prandtla,	Sh – liczba Sherwooda,
Re – liczba Reynoldsa,	Stk – liczba Stokesa.

Indeksy

0 – dotyczy stanu wyjściowego,	gr – graniczny,
1 – dotyczy fazy ciekłej,	k – dotyczy kropki,
2 – dotyczy fazy gazowej,	sep – dotyczy separacji,
całk – całkowity,	siatki – dotyczy siatki.

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

1. Wstęp

Pakiety siatkowe zyskały ostatnio szerokie zastosowanie w dziedzinie separacji kropeł cieczy z mieszanin gazowo-cieczowych. Dokładny opis fizyczno-matematyczny tego rodzaju separacji jest bardzo trudny. Zjawisko to jest dlatego tak skomplikowane, że stosunkowo prostemu efektowi osadzania się kropeł na drutach towarzyszą procesy tworzenia, spływu i zrywania się filmów wodnych. Dla dostatecznie dużych kropeł przeważa inercyjny mechanizm osiadania, natomiast dla kropeł małych (tzw. brownowskich) przeważa mechanizm dyfuzyjny. Oczywiście pomiędzy dużymi i małymi wielkościami kropeł istnieje pewien obszar przejściowy, gdzie obydwa mechanizmy nakładają się na siebie. Większość dotychczasowych publikacji dotyczyła mechanizmu inercyjnego osiadania kropeł co najmniej kilkumikrometrowych (np. [1, 2, 3]). Tymczasem okazało się, że gęsto plecione siatki mogą także efektywnie usuwać krople brownowskie. Jest to istotne z technicznego punktu widzenia, szczególnie w takich przypadkach, gdzie stosowanie efektywnych metod czynnych (z doprowadzeniem energii z zewnątrz) jest niemożliwe. W dotychczasowej literaturze (głównie chemicznej) można spotkać prace dotyczące dyfuzyjnego osiadania kropeł na siatkach, ale obliczenia takie nie uwzględniały dyfuzji turbulentnej. Obliczenia takie przedstawiono np. w pracach [4, 5, 6], otrzymując wyraźnie zaniżone wartości współczynników separacji całych siatek (lub też współczynników osiadania). Przykładowo Stairmand [6] podaje obliczoną przez siebie sprawność separacji dyfuzyjnej od 1,3 do 2% dla kropeł $0,5 \div 1,5 \mu\text{m}$, podczas gdy Bürkholz, dla takiego samego w przybliżeniu separatora kropeł, podaje wartości zmierzone $20 \div 75\%$. Wytłumaczenie tego faktu wydaje się stosunkowo proste. Wiadomo bowiem, że realny przepływ przez siatki ma charakter turbulentny i dlatego trzeba operować współczynnikami dyfuzji turbulentnej, które są na ogół znacznie większe od współczynników dyfuzji molekularnej. W niniejszej pracy obliczenie dyfuzji oparto na podobieństwie dyfuzji ciepła i masy przez co automatycznie uwzględniono dyfuzję o charakterze turbulentnym [7]. Obliczenia współczynników osiadania i separacji pakietów wykonano przy założeniu, że elementami siatki są druty o kształcie cylindrycznym.

2. Teoria dyfuzyjnego osiadania kropeł brownowskich na pojedynczym cylindrze

Dyfuzyjny mechanizm osiadania kropeł na przeszkodach typu cylinder ma miejsce jedynie w przypadku jeśli krople dość dobrze nadążają za zmianami prędkości przepływu gazu, w szczególności zaś za pulsacjami turbulentnymi. Ma to miejsce dla bardzo małych średnic kropeł. Górna granica wielkości tych kropeł jest dość płynna i zależy od konkretnych warunków przepływu. Dla mieszaniny powietrzno-wodnej, w warunkach zbliżonych do atmosferycznych, maksymalne wielkości kropeł (cząstek), które biorą udział w dyfuzji podawane w [4] wynoszą $d \approx 10 \mu\text{m}$. Wydaje się jednak, że wartość ta jest mocno przesadzona i właściwą granicę należy, zgodnie z pracą [7], szacować na poniżej 1 mikrometra. W takim przypadku mieszaninę kroplowo-gazową traktować można jako ośrodek gazowy i wówczas do konkretnych obliczeń współczynników osiadania kropeł stosować można podobieństwo dyfuzji masy i ciepła [7, 8].

Istnieje jeszcze jedno ograniczenie stosowalności teorii dyfuzyjnej w rozpatrywanym przypadku. Z ilości kropeł znajdującej się w pewnej objętości można wyznaczyć średnie odległości międzykropłowe. Ta wielkość musi być znacznie mniejsza od wymiaru charakterystycznego przepływu (w tym przypadku średnicy cylindra), wtedy bowiem mogłoby się zdarzyć, że w procesie dyfuzji na cylindrze biorą udział tylko pojedyncze krople. W praktyce powyższy warunek dla bardzo małych kropeł, mniejszych od 1 μm , i przy technicznie interesujących koncentracjach $y \approx 10\%$ jest zwykle spełniony.

Przy obliczaniu dyfuzyjnego osiadania kropeł na przeszkodzie korzysta się ze znanych w wymianie ciepła wzorów typu

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (2.1)$$

Zmieniając w nich Nu na Sh oraz Pr na Sc otrzymujemy zależność dla wymiany masy

$$Sh = f(Re, Sc), \quad (2.2)$$

gdzie

$$Sh = \frac{\beta l}{D}, \quad Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.3)$$

(β — współczynnik przejmowania masy, l — wymiar charakterystyczny, w tym przypadku średnica cylindra).

W [8] można znaleźć liczne wzory empiryczne opisujące wymianę ciepła w przypadku opływu cylindra. Przykładowo, dla zakresu liczb Reynoldsa

$$0,4 < Re < 4000,$$

odpowiadającemu warunkom przepływu przez wkłady siatkowe, podawany jest następujący wzór:

$$Nu = 0,53 Re^{0,50} Pr^{0,35}. \quad (2.4)$$

Wobec tego, dla tego samego zakresu liczb Reynoldsa, mamy odpowiednio:

$$Sh = 0,53 Re^{0,50} Sc^{0,35}. \quad (2.5)$$

Mając współczynnik przejmowania masy

$$\beta = Sh \frac{D}{2R}, \quad (2.6)$$

gdzie R — promień cylindra, można obliczyć gęstość strumienia kropeł na cylindrze

$$j = \beta (n - n_p). \quad (2.7)$$

We wzorze tym n_p oznacza koncentrację masową kropeł przy powierzchni cylindra. Przyjmując, że wszystkie krople dotykające cylindra osiadają na nim możemy założyć, że

$$n_p = 0.$$

Równanie (2.7) przyjmie wówczas prostą postać

$$j = \beta n. \quad (2.8)$$

Znając gęstość strumienia dopływających do cylindra kropeł można obliczyć współczynnik osiadania ξ . Do cylindra o długości L dopływa strumień

$$J = 2RLnw, \quad (2.9)$$

gdzie w – prędkość napływu.

Ilość kropeł osiadającą na cylindrze określa równanie

$$\Delta J = j2\pi RL = 2\pi\beta nRL. \quad (2.10)$$

Wobec tego, współczynnik osiadania można określić jako

$$\xi = \frac{\Delta J}{J} = \frac{\pi\beta}{w}. \quad (2.11)$$

Kojarząc tę zależność z (2.6), otrzymuje się

$$\xi = \frac{\pi D}{2Rw} Sh = \frac{\pi D}{vRe} Sh, \quad (2.12)$$

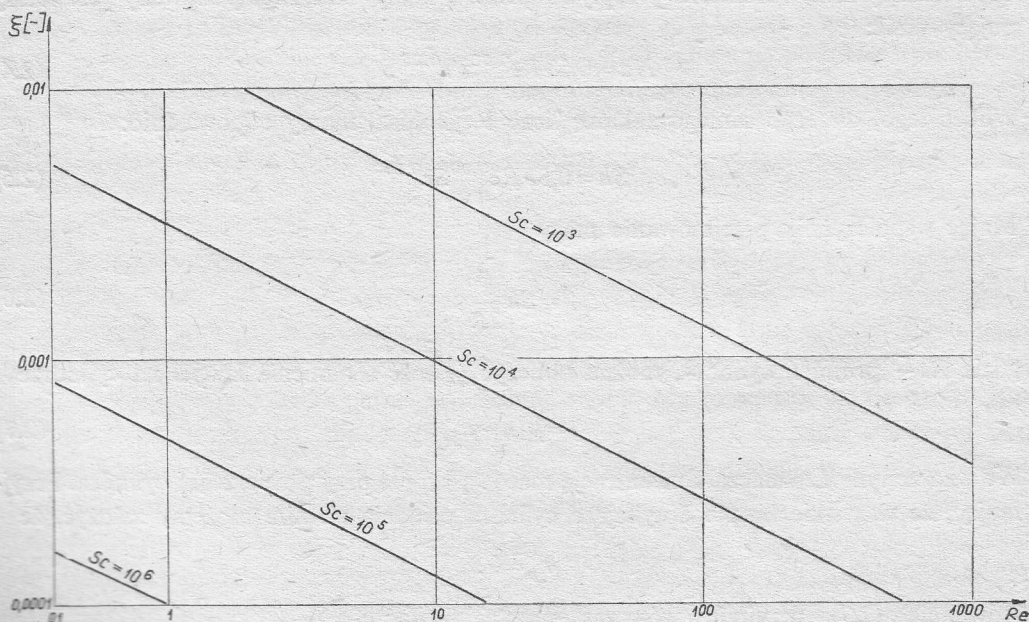
oraz

$$\xi = \frac{\pi Sh}{Sc Re}. \quad (2.13)$$

Korzystając następnie z (2.5) otrzymuje się ostatecznie

$$\xi = 1,66 Re^{-0,50} Sc^{-0,69}. \quad (2.14)$$

Na rys. 1 przedstawiono rezultaty obliczeń współczynników osiadania na walcu w funkcji liczby Reynoldsa, według przedstawionego wzoru (2.14). Obliczenia wykonano



Rys. 1. Zmiana dyfuzyjnego współczynnika osiadania kropeł na cylindrze w przepływie gazu w funkcji liczby Reynoldsa

dla różnych liczb Schmidta. W tabeli 1 przedstawiono dane dotyczące liczby Schmidta dla mieszaniny powietrza z wodą przy zmieniających się wielkościach średnic kropelek. Współczynniki dyfuzji obliczono według danych Fuksa [9] i według równań podanych w [10]. Z tabeli 1 widać, że zastosowana w niniejszej pracy analogia połączona jest z pewną

Tabela 1

Czynnik	Parametry termodynamiczne P, T, ρ_2, ρ_1	Promień kropeł $r [\mu\text{m}]$	Współczynnik dyfuzji $D [\text{m}^2/\text{s}]$	Współczynnik lepkości $\nu [\text{m}^2/\text{s}]$	Sc
Mieszanina wody i powietrza	$P=1 \text{ bar}$	0,1	$2,21 \cdot 10^{-10}$	$\uparrow$ $1,49 \cdot 10^{-5}$ $\downarrow$	$6,7 \cdot 10^4$
	$T=273,15\text{K}$				
	$\rho_2=1000 \text{ kg/m}^3$	0,5	$0,274 \cdot 10^{-10}$		$5,4 \cdot 10^5$
	$\rho_1=1,2 \text{ kg/m}^3$	1	$0,127 \cdot 10^{-10}$		$1,18 \cdot 10^6$
		5*	$0,024 \cdot 10^{-10}$		$6,2 \cdot 10^6$

* Obliczenia wykonane dla kropeł $5 \mu\text{m}$ dotyczą wspomnianego we wstępie obszaru przejściowego i mają charakter orientacyjny, jako że model dyfuzyjny dla kropeł większych od 1 mikrometra nie jest bardzo dokładny.

ekstrapolacją wyników doświadczalnych. W tabeli tej znajdują się liczby Schmidta o rzędzie wielkości $10^4 \div 10^6$, podczas gdy odpowiadające im liczby Prandtla, dla których wykonywane były badania doświadczalne prowadzące do wzorów typu (2.1), były rzędu 10^3 (niektóre gęste oleje). Argumentem przemawiającym za dopuszczalnością poszerzenia zakresu liczb Prandtla (Schmidta) może być jednak fakt istnienia pewnego uzasadnienia teoretycznego dla potęgowej zależności $Nu(Pr)$ (patrz np. [12]).

3. Proces inercyjnego osiadania kropeł na pojedynczym cylindrze

Efekt bezwładnościowego osiadania kropeł cieczy lub cząstek ciała stałego z fazy gazowej na powierzchniach cylindrycznych typu walcowego (za który można uważać pojedynczy drut w pakiecie siatkowym) jest jednym z klasycznych zadań mechaniki aerologii. Obliczenia takie prowadzone były także w IMP PAN [10]. Równaniem wyjściowym było w tej pracy równanie ruchu cząstki w gazie w postaci

$$m \frac{d\vec{w}_2}{dt} = C_D A \rho_1 \frac{|\vec{w}_1 - \vec{w}_2|^2}{2} \frac{\vec{w}_1 - \vec{w}_2}{|\vec{w}_1 - \vec{w}_2|}. \quad (3.1)$$

Równanie rozwiązano numerycznie zakładając, że:

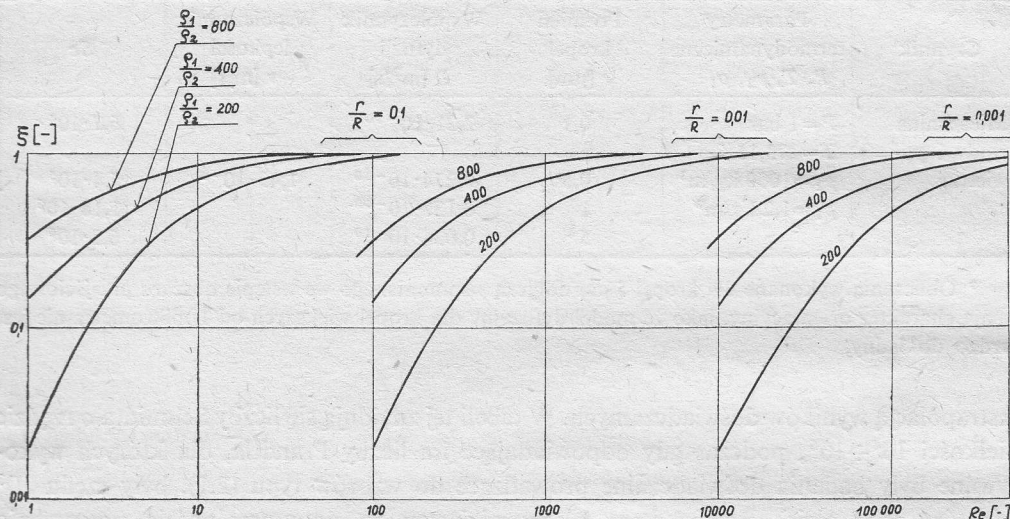
- opływ cylindra jest potencjalny,
- cząstki (krople) mają kształt kul,
- nie ma oddziaływania cząstek na przepływ,
- stosunek średnic kropeł do średnicy walca jest bardzo mały.

Efektem końcowym obliczeń było określenie współczynnika osiadania, który w tym przypadku zdefiniowany był jako stosunek szerokości obszaru przed przeszkodą, z któ-

rego krople osiadają na przeszkodzie, do średnicy tej przeszkody (rys. 10 w [11])

$$\xi = \frac{y_{gr}}{2R}. \quad (3.2)$$

Okazało się [11], że współczynnik osiadania zależy wyłącznie od bezwymiarowych liczb podobieństwa Re_k i Stk . Rozważając proces osiadania na powierzchni walcowej kroplel



Rys. 2. Zmiana bezwładnościowego współczynnika osiadania kroplel w gazie w funkcji liczby Reynoldsa na przeszkodzie cylindrycznej przy zmiennych ρ_1/ρ_2 i r/R

drobnych (około mikrometrowych), w zakresie prędkości przepływu gazu nie większej niż kilkanaście m/s (realnej prędkości przepływu przez siatki), można bez większych błędów przyjąć, że

$$Re_k < 1, \quad \text{gdzie} \quad Re_k = \frac{(w_1 - w_2)2r}{v_1}. \quad (3.3)$$

Wówczas

$$C_D \approx \frac{24}{Re_k}, \quad (3.4)$$

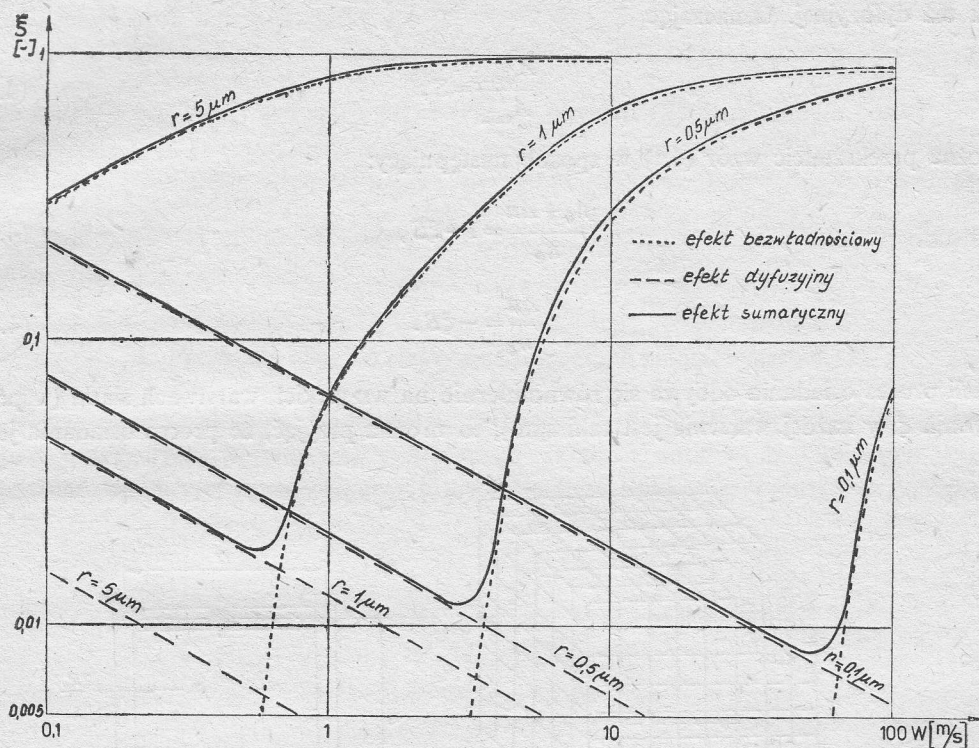
$$\xi = f(Stk), \quad \text{gdzie} \quad Stk = \frac{2}{9} \frac{\rho_2}{\mu_1} \frac{r}{R} w_1. \quad (3.5)$$

Na rys. 2 przedstawiono zależność na współczynnik osiadania w zmienionej w stosunku do pierwotnego postaci

$$\xi = f(Re) \quad \text{dla} \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{ i } \frac{r}{R} = \text{var},$$

gdzie

$$Re = \frac{w_1 2R}{v_1}. \quad (3.6)$$



Rys. 3. Zmiana sumarycznego współczynnika osiadania kropeł wody z przepływu powietrza na powierzchni cylindrycznej

Na rys. 3 przedstawiono jak zmieniają się współczynniki osiadania kropeł wody na powierzchni cylindrycznej w funkcji prędkości powietrza, dla mechanizmu dyfuzyjnego i bezwładnościowego. Na rysunku tym przedstawiono także sumaryczny efekt osiadania, który otrzymano z superpozycji

$$\xi_{\text{sep}} = \xi_{\text{bezwł}} + \xi_{\text{dyf}} \quad (3.7)$$

4. Ogólne zależności dla separatorów wielowarstwowych typu pakietów siatkowych

Separatory typu siatki traktować można jako elementy złożone z pojedynczych przeszkód typu walca, ułożonych warstwami. Typowy schemat siatki pokazano na rys. 4. Jeżeli założyć, że krople są o wiele mniejsze od drutów siatki oraz, że wszystkie kropelki docierające do tych drutów są separowane z przepływu, to zmianę koncentracji fazy ciekłej przy przejściu przez pojedynczą warstwę zapisać można w postaci

$$\frac{n}{n_0} = 1 - \xi \frac{A_{\text{siatki}}}{A_{\text{całk}}}, \quad (4.1)$$

gdzie współczynnik osiadania ξ uwzględnia zarówno proces separacji bezwładnościowej

jak też dyfuzyjnej. Oznaczając

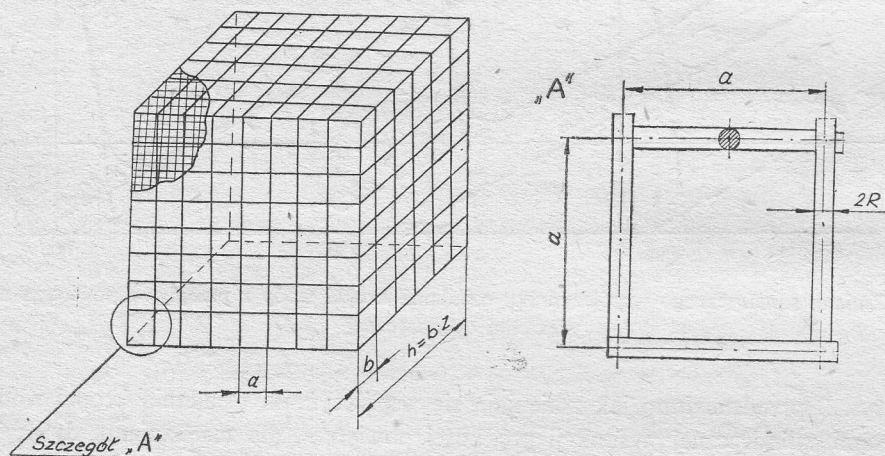
$$\frac{A_{\text{siatki}}}{A_{\text{całk}}} = S, \quad (4.2)$$

można przekształcić wzór (4.1) w sposób następujący:

$$\frac{n_0 + \Delta n}{n_0} = 1 - \xi S, \quad (4.3)$$

$$\frac{\Delta n}{n_0} = -\xi S. \quad (4.4)$$

Jeżeli proces osiadania odbywa się równomiernie na wszystkich warstwach siatki (współczynnik ξ w każdej warstwie jest taki sam), to można przyjąć, że proces osiadania jest



Rys. 4. Schematyczny rysunek wycinka siatki i jej pojedynczego oczka (przekrój drutu kołowy $2R$)

proporcjonalny do przyrostu wymiaru poprzecznego siatki Δh . Wobec tego można przyjąć równanie

$$\frac{\Delta n}{n} = -\xi S \frac{\Delta h}{b}. \quad (4.5)$$

Przechodząc z różnicami do zera, można otrzymać podstawowe równanie różniczkowe procesu osiadania kropeł w wielowarstwowych separatorach siatkowych w postaci:

$$\frac{dn}{n} = -\xi S dz, \quad (4.6)$$

które po scałkowaniu (przy założeniu, że $h=bz$) daje następującą zależność:

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\xi S z}, \quad (4.7)$$

Stąd efektywność separacji siatki

$$\eta_{\text{sep}} = 1 - e^{-\xi S z} \quad (4.8)$$

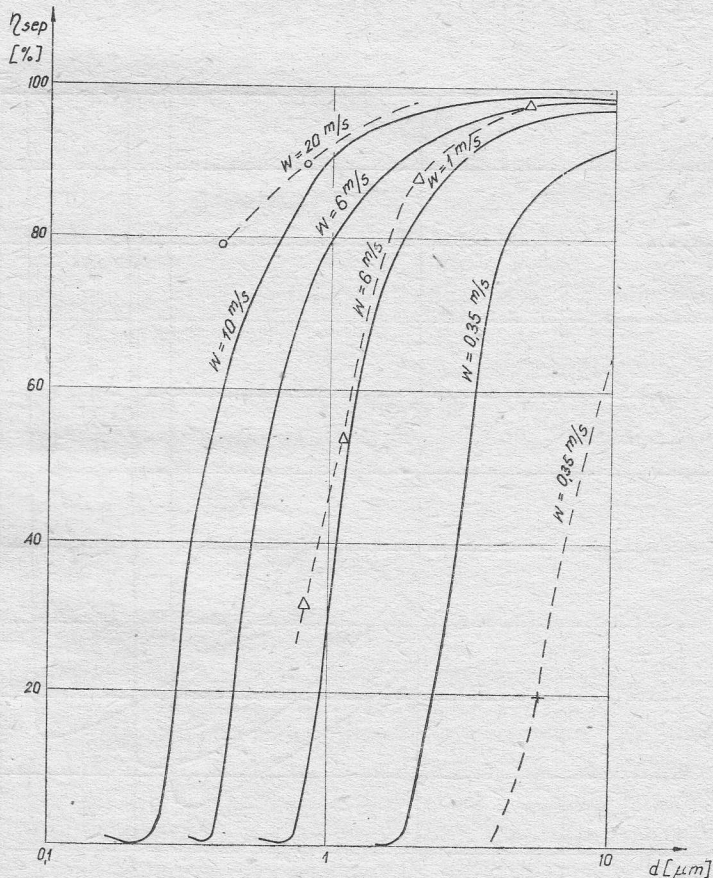
Dla siatek o regularnej geometrii oczek (rys. 4) wyrażenie (4.8) przyjmuje postać

$$\eta_{\text{sep}} = 1 - e^{-\xi \left(\frac{\Delta R}{a+R} \right) z} \quad (4.9)$$

Powyższe równania stanowią podstawę ogólnej teorii wielowarstwowych separatorów siatkowych.

5. Przykłady obliczeń efektywności separacji pakietów siatkowych

Korzystając z zależności podanych w poprzednich rozdziałach obliczono sprawności separacji typowych, powszechnie stosowanych wkładów siatkowych. Obliczenia wykonano dla dwóch typowych wkładów firmy Vereinigte Füllkörper Fabrik. W literaturze



Rys. 5. Zmiana sprawności separacji wybranej siatki typu demister w funkcji wielkości kropli w przepływie zawilgoconego powietrza dla zadanych prędkości przepływu. Punktami oraz liniami przerywanymi naznaczono dane eksperymentalne

Tabela 2

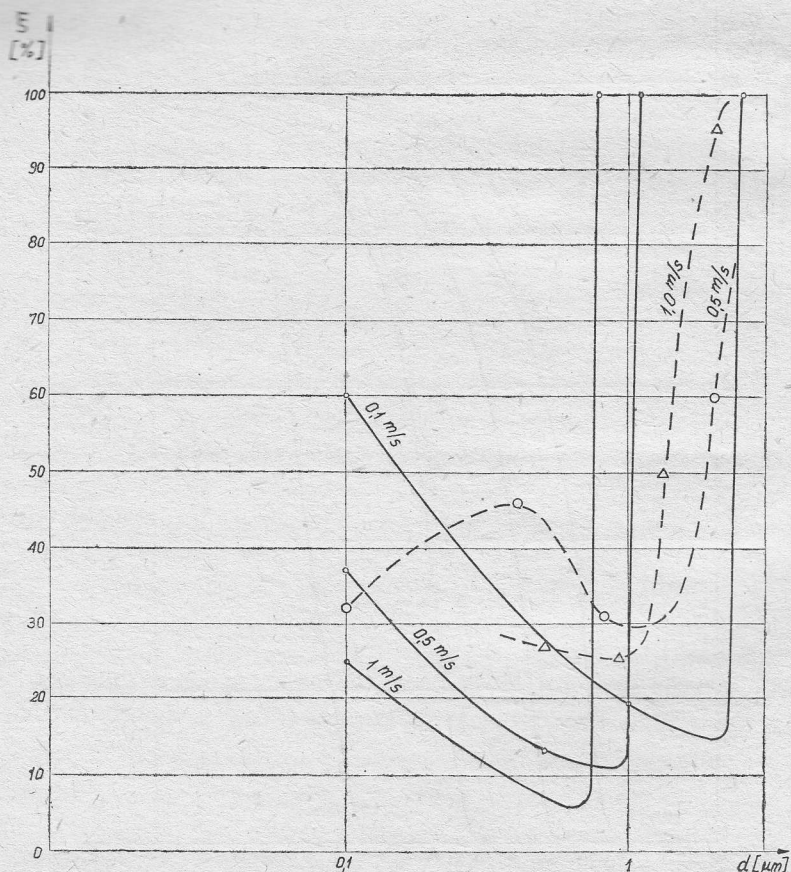
Rodzaj siatki	Powierzchnia [mm ²]	2R [mm]	a [mm]	b [mm]	Z —	$S = \frac{A_{\text{siatki}}}{A_{\text{całk}}}$ —
Demister	150 × 150	0,25	2,5	2	20	0,17
Filtr	300 × 300	~ < 0,1	—	—	850	0,47

chemicznej nazywa się je odpowiednio: demister i filtr. Niektóre dane charakterystyczne tych siatek zebrano w tabeli 2 według [5].

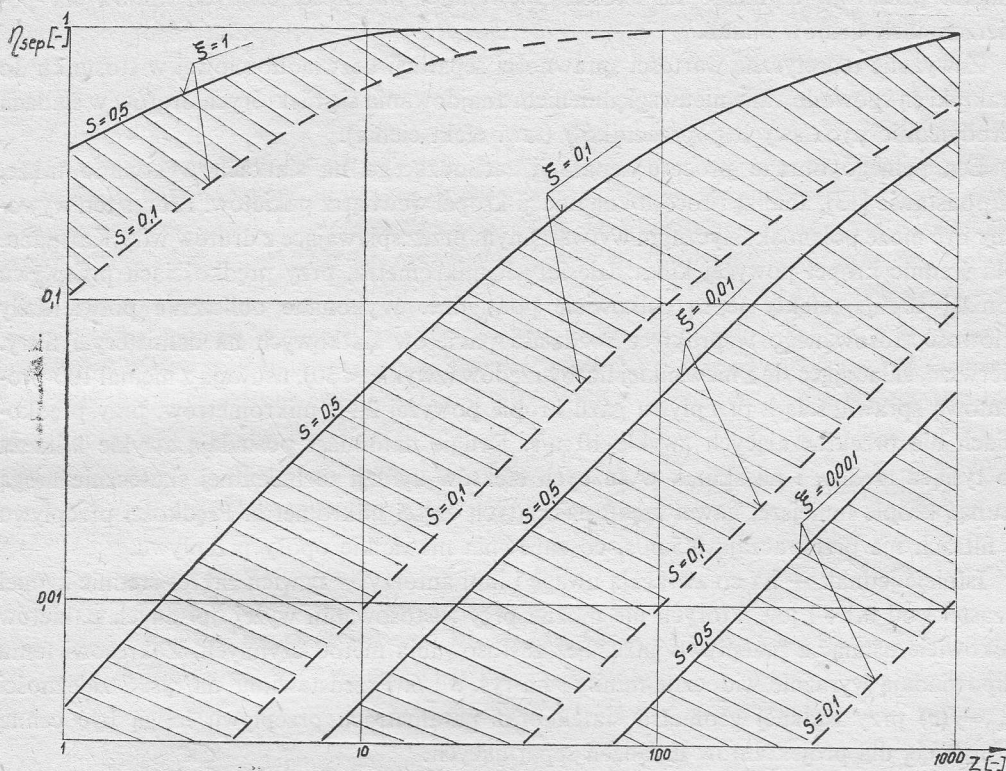
Na rys. 5 i 6 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci wykresów

$$\eta_{\text{sep}} = f(d) \quad \text{przy } w = \text{const}$$

dla zawilgoconego powietrza. Na rysunkach tych naniesiono dane eksperymentalne Bürkholza [5] w postaci punktów i linii przerywanych. Na rys. 7 przedstawiono, jak



Rys. 6. Zmiana sprawności separacji wybranej siatki typu filtr w funkcji wielkości kropli w przepływie zawilgoconego powietrza dla zadanych prędkości przepływu. Punktami oraz liniami przerywanymi naznaczono dane eksperymentalne



Rys. 7. Zmiana współczynnika separacji pakietów siatkowych η_{sep} w funkcji liczby rzędów z dla zadanych współczynników osiadania ξ oraz stosunków powierzchni S

na proces separacji wpływa ilość rzędów w siatce przy zadanych wartościach współczynnika osiadania. Wykresy podano dla dwóch typów „gęstości” siatek — $S=0,5$ i $S=0,1$, odpowiadających stosowanym powszechnie wkłodom typu „filtr” i „demister”.

6. Wnioski

Przeprowadzona analiza procesu separacji kropeł na siatkach potwierdziła istotne znaczenie dyfuzji turbulentnej w zakresie separacji dyfuzyjnej. Obliczenia odpowiedniego współczynnika dyfuzji turbulentnej z analogii wymiany ciepła i masy wykazują dość dobrą zgodność z istniejącymi wynikami badań eksperymentalnych (bardzo skąpyimi ze względu na skomplikowany charakter doświadczenia). W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że w przyszłości w celu rozszerzenia możliwości zastosowania wymienionej wyżej analogii należy przebadąć wymianę ciepła na walcach przy bardzo dużych liczbach Prandtla, lub wymianę masy na cylindrach przy dostatecznie dużych liczbach Schmidta.

Nieco zaniżone wartości obliczonej sprawności separacji dyfuzyjnej w stosunku do zmierzonej mogą być spowodowane niedokładnymi danymi wyjściowymi (dotyczącymi np. współczynników dyfuzji, lepkości itp.). Głównym jednak powodem wydaje się

zmiana przekroju czynnego na skutek zalewania i obecności ciekłych filmów na powierzchniach drutów siatek.

Zawyżone teoretyczne wartości sprawności separacji bezwładnościowej w stosunku do praktyki są spowodowane nieuwzględnieniem znajdowania się niektórych drutów w śladach aerodynamicznych swych poprzedników (tzw. efekt cienia).

Dla pełnego obrazu procesu separacji zachodzącego na siatkach wykonano także, na podstawie [13], analizę procesu koagulacji kropeł wewnątrz pakietów. Proces ten wywołany być może polem akustycznym wytwarzanym przez spływające z drutów wiry Karmana. Dla średnic kropeł powyżej kilku dziesiątych mikrometra, przy prędkościach przepływu poniżej 10 m/s, efekty te są całkowicie pomijalne. Wykonane obliczenia potwierdziły celowość stosowanego w praktyce rozdziału pakietów siatkowych na demistry i filtry. Pierwsze, składające się z niewielkiej liczby rzędów (zwykle < 30), usuwają z niemal 100-procentową sprawnością z przepływu gazu krople powyżej $2 \div 3$ mikrometrów, przy prędkościach nie przekraczających zwykle 10 m/s. Drugie natomiast posiadają zwykle kilkaset do tysiąca rzędów i na skutek wyraźnych efektów dyfuzji turbulentnej skutecznie mogą usunąć krople mniejsze, nawet rzędu dziesiątych części mikrometra. Prędkości przepływu w filtrach nie przekraczają 0,5 m/s, co zapewnia niewielkie opory przepływu.

Istnieje jednak — na co zwracają uwagę i inni autorzy — pewien zakres średnic kropeł (cząstek) od $0,1 \div 1 \mu\text{m}$, których nie można przy zastosowaniu wyżej opisanych pakietów całkowicie usunąć z przepływu gazu, bez zastosowania metod czynnych. Zakresowi temu odpowiadają wyraźnie widoczne minima na rys. 3 i 6. Przedstawione na rys. 7 zależności $\eta_{\text{sep}} = f(z)$ przy zadanej geometrii siatek oraz parametrach przepływu mogą być cenną informacją dla projektantów urządzeń separujących.

Praca wpłynęła do Redakcji w maju 1976 r.

Literatura

- [1] A. Bürkholz, *Tropfenabscheider*. Übersicht zum Stande des Wissens. Chemie. Ing. Techn. 8/1972.
- [2] A. Gardzilewicz, S. Zarzycki, *Badania separacji kropeł na wkładach siatkowych w mieszaninie wodno-powietrznej*. Oprac. wewn. IMP PAN nr 104/1973.
- [3] H. Saemundsson, *Abscheidung von Öltropfen aus strömender Luft mit Drahtgastuchpaketen*. Sonderdruck aus Verfahrenstechnik 2/1968, 11.
- [4] G. Watzel, *Untersuchung von Tropfenbahnen in umlenkten Strömungen und ihre Anwendung auf Tropfenabscheidung in Trocknern*. VDI Verlag, Düsseldorf 1970.
- [5] A. Bürkholz, *Tropfenabscheidung an Drahtfiltern*. Chemie. Ing. Techn. 42/1970.
- [6] J. Stairmand, *Dust Collection by Impingement and Diffusion*. Trans. Inst. Chem. Eng., Vol. 28, 1949.
- [7] A. Gardzilewicz, *Analogia wymiany ciepła i masy w zastosowaniu do obliczeń dyfuzji turbulentnej w przepływie gazu i kropeł na elementach separujących*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 5/868/1977.
- [8] E. Eckert, R. Drake, *Heat and Mass Transfer*. New York, Toronto, London 1959.
- [9] N. A. Fuks, *Mechanika aerozolej*. Izd. Akademii Nauk, Moskwa 1955.
- [10] J. Kołodko, *Analiza możliwości zastosowania sztucznej turbulizacji do intensyfikacji separacji kropeł z przepływu*. Oprac. wewn. IMP PAN nr 229/1973.
- [11] S. Krzeczkowski, *Wstępne wyniki badania ruchu kropeł w przepływie przed przeszkodą cylindryczną*. Prace IMP, z. 40, 1968.
- [12] L. Landau, E. Lifszic, *Mechanika ośrodków ciągłych*. PWN, Warszawa 1958.
- [13] A. Gardzilewicz, *Próba asocjacji kropeł pary wodnej przy pomocy ultradźwięków*. Oprac. wewn. IMP PAN nr 204/1972.

Анализ процесса сепарации на сетках в двухфазных течениях

Резюме

В работе представлены расчеты сепарационной способности сеточных пакетов для течений мелких капель, диаметром 0,1 - 10 μm в газе. В особенности исследовался инерционный и диффузионный эффект сепарации. С целью определения диффузионного эффекта сепарации капель пользовались аналогией между теплообменом и массообменом (уравнения (3.1) и (3.2)). Путем простых превращений получено уравнение для коэффициента диффузионного осаждения капель на цилиндре (уравнение (3.14)). Результаты расчетов этого коэффициента в функции критерияльных чисел Re и Sc представлены на рис. 1. Коэффициенты инертного осаждения капель вычислены по уравнению движения (уравнение (4.1)). Результаты расчетов представлены на рис. 2. На рис. 3 представлен суммарный график коэффициентов диффузионного и инертного осаждения капель на цилиндре в функции скорости течения газа. Расчеты коэффициента сепарации на сетках проводились при предположении, что сеточные пакеты состоят из слоисто расположенных цилиндров (уравнение (5.9)). Результаты расчетов коэффициентов сепарации на двух характеристических вкладах (таблица 2) представлены на рис. 5 и 6. На этих графиках нанесены экспериментальные данные в виде точек и пунктирных линий. Достигнута довольно хорошая сходимость упрощенной теории с экспериментом.

Analysis of the Separation Process on Grids in Two-Phase Flows

Summary

Calculations of the separating capacity of grid packs for flows of small droplets of 0.1 - 10 μm in a gas have been presented in the paper. The inertial and diffusive effects of separation have been studied in particular. In order to determine the diffusive effect of droplet separation an analogy between the heat and mass transfer (equations (3.1) and (3.2)) has been used. Simple transformations have led to an equation for a coefficient of diffusive settling of droplets on a cylinder (equation (3.14)). The results of calculations of this coefficient versus characteristic numbers Re and Sc have been shown in Fig. 1. Coefficients of the inertial droplet settling have been calculated from an equation of motion (equation (4.1)). The results have been shown in Fig. 2, while in Fig. 3 a cumulative and inertial settling of droplets on a cylinder as dependent on the gas flow velocity has been presented. The calculations of the coefficients of separation on grids have been made on an assumption that the grid packs consist of layers of cylinders (equation (5.9)). The results of calculations of coefficients of separation by two characteristic systems (Table 2) have been shown in Figs. 5 and 6. The diagrams show also the experimental results, marked with points and dashed lines. A satisfactory agreement between the simplified theory and the experiment has been obtained.