

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

PRACE
I N S T Y T U T U M A S Z Y N
P R Z E P Ł Y W O W Y C H

T R A N S A C T I O N S
O F T H E I N S T I T U T E O F F L U I D - F L O W M A C H I N E R Y

82

W A R S Z A W A - P O Z N A Ń 1982

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 PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK
KAZIMIERZ STELLER · ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY · CHAIRMAN)
JÓZEF ŚMIGIELSKI

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 1982

Printed in Poland

ISBN 83-01-03979-5
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340 + 90 egz.	Oddano do składania 12 X 1981 r.
Ark. wyd. 12 Ark. druk. 9,25	Podpisano do druku 18 V 1982 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g 70 × 100 cm.	Druk ukończono w maju 1982 r.
Nr zam. 577/122. W-6/523.	

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

BRUNON GROCHAL, EDWARD ŚLIWICKI
ALEKSANDER JEZERSKI

Gdańsk

Mieszanie cieczy w mieszalniku strumieniowym*

Praca zawiera wyniki badań doświadczalnych mieszania w mieszalniku strumieniowym strumieni wody i olejów napędowych. Okazało się, że wyniki pomiarów dobrze koreluje parametr zaproponowany przez Hartunga i Hiby'ego [9], którym jest stosunek strumieni pędów.

Wykaz oznaczeń

a_n	— stała,	u	— prędkość,
A_n	— stała,	$\dot{V}$	— natężenie przepływu,
c	— cecha odróżniająca strumienie (np. stężenie barwnika lub temperatura),	x	— współrzędne wzdłuż osi kanału mieszalnika,
d	— średnica wewnętrznego kanału mieszalnika,	δ	— lokalne odchylenie cechy c od jej wartości po wymieszaniu,
D	— średnica zewnętrznego kanału mieszalnika,	$\tilde{\delta}$	— odchylenie średnie,
F	— pole przekroju poprzecznego,	φ	— funkcja ujmująca zmianę burzliwości strumienia wzdłuż osi x .
I_0	— funkcje Bessela zerowego rzędu,	Indeksy dotyczą:	
I_1	— funkcje Bessela pierwszego rzędu,		
I	— stopień wymieszania,	0	— odcinka początkowego mieszania,
K_D	— współczynnik dyfuzji promieniowej,	1,2	— mieszanych strumieni odpowiednio: wewnętrznego, zewnętrznego,
l	— odległość przekroju pomiarowego od wlotu,	i	— miejsca w kanale mieszalnika,
$\dot{p}$	= $\dot{m}u$ — strumień pędu,	M	— stanu całkowitego wymieszania,
r	— promień kanału,	Mc	— stanu o ustabilizowanym profilu stężenia,
$R_{1,2}$	— promienie kanałów mieszalnika, odpowiednio: wewnętrznego i zewnętrznego,	Mu	— stanu o ustabilizowanym profilu prędkości,
r_t	= r/R_2 ,	p	— początku mieszania (wlotu).

1. Wstęp

Mieszanie jest procesem powszechnie występującym w technice. Dążenie do stosowania coraz wydajniejszych technologii doprowadziło do zainteresowania się możliwościami zintensyfikowania mieszania przepływowego, tzn. zachodzącego w kanale przy ciągłym

* Praca wykonana w ramach problemu węzłowego 03.7 „Inżynieria i aparatura chemiczna”.

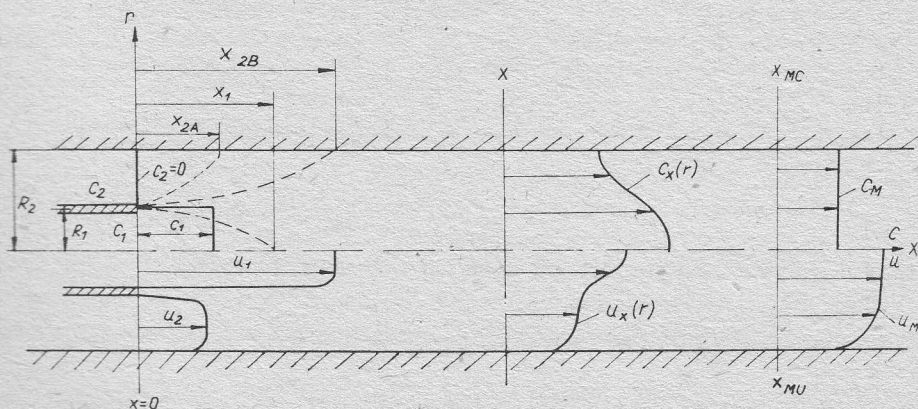
przepływie czynników [1]. Urządzeniem, które nadaje się do użycia jako mieszalnik przepływowy, zwłaszcza do cieczy i gazów, jest strumienica. Wykorzystuje się w niej efekty istnienia dużej burzliwości spowodowanej głównie różnicą prędkości doprowadzanych strumieni mieszanych czynników.

Do opisu zjawisk zachodzących w takim mieszalniku można wykorzystać teorię strugi swobodnej wpływającej do płynącego współprądowo ośrodka, jednak jest to tylko przybliżenie rzeczywistości, ponieważ obecność ścianek dość mocno komplikuje sytuację. Teoria strug, w szczególności dotyczy to opisu matematycznego odcinka początkowego, nie jest jeszcze zadowalająco opracowana [2, 3, 4]. Badania przepływów tego rodzaju trwają (np. [5, 6, 7]) i ze względu na złożoność występujących zjawisk opis ich napotyka duże trudności. Z drugiej strony można znaleźć w literaturze prace czysto eksperymentalne (np. [8, 9]), które mają na celu dostarczenie informacji umożliwiających projektowanie mieszalników przepływowych. Wyniki tych badań potwierdzają istnienie znanej od dawna analogii między procesami burzliwego przenoszenia masy (mieszania burzliwego) i nie-stacjonarnego przewodzenia ciepła w ciałach stałych. W szczególności można mówić o „regularnym reżimie” mieszania przepływowego, analogicznym do „regularnego reżimu” przewodzenia ciepła [10, s. 81]. Analogia ta występuje również w przypadku mieszania w zbiorniku, na co wskazują wyniki odpowiednich badań [1, 12].

Badania mieszania przepływowego podjęto niedawno również w IMP PAN. Prace te są prowadzone w ramach problemu węzłowego „Inżynieria i aparatura chemiczna” A-03.7 koordynowanego przez Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie.

2. Opis procesu mieszania

Rozważmy mieszanie się dwóch strumieni cieczy, 1 i 2, w strumienicy pokazanej na schemacie w przekroju na rysunku 1. Niech strumienie 1 i 2 różnią się pewną cechą c , na przykład stężeniem barwnika. Niech dalej, stężenie barwnika wynosi $c=c_1$ w strumieniu 1 oraz $c=0$ w strumieniu 2. Po zetknięciu się strumieni w przekroju wlotowym $x=0$ barwnik ze strumienia 1 będzie przenoszony w obszar strumienia 2, tzn. $r > R_1$,



Rys. 1. Szkic do opisu przebiegu mieszania w mieszalniku przepływowym typu strumienicy

$$F_M = F_1 + F_2, \quad F_1 = \pi R_1^2, \quad F_2 = \pi (R_2^2 - R_1^2)$$

natomiast ciecz ze strumienia 2 przenoszona jest w obszar strumienia 1, tzn. $r < R_1$. W rezultacie, po przepłynięciu przez strumień 2 pewnej odległości x_2 można stwierdzić obecność barwnika przy ścianie. W strumieniu 1 na pewnej odległości od wlotu utrzymuje się stężenie barwnika c_1 , przy tym najdłużej na osi — oznaczmy tę maksymalną odległość przez x_1 . Wzajemna relacja między odległościami x_2 i x_1 , tzn. a) $x_2 < x_1$ lub b) $x_2 > x_1$, zależy od stosunku promieni R_2/R_1 oraz od intensywności mieszania. Na wzrastających odległościach $x > x_2$ osiągane są stany pośrednie wymieszania, określone profilem stężenia $c_x(r)$ oraz profilem prędkości $u_x(r)$, wreszcie w odległości x_{Mc} zostaje osiągnięte wymieszanie zupełne, tzn. ustabilizowany profil stężenia określony jest jako $c(r) = c_M = \text{const}$ (jeśli nie występuje separacja).

Analogiczna sytuacja występuje w odniesieniu do prędkości. Profile prędkości zmieniają się w kierunku przepływu, aż do wykształcenia się profilu ustabilizowanego $u_M(r)$, przy tym ustabilizowane profile stężenia i prędkości mogą być osiągane w różnych odległościach, tzn. $x_{Mc} \neq x_{Mu}$.

Wymieszanie następuje głównie na skutek burzliwości, przy czym intensywność mieszania zmienia się wzdłuż przepływu. Okazuje się, że intensywność mierzona wielkością naprężeń reynoldsowskich — silnie zależy od różnicy prędkości strumieni, w przekroju wlotowym [5]. Znowu, podobnie jak dla stężenia i prędkości, można mówić o ewolucji profilu naprężeń reynoldsowskich aż do osiągnięcia profilu ustabilizowanego, tzn. odpowiadającego ustabilizowanemu przepływowi mieszaniny, który zresztą może być laminarny. Ogólnie można więc powiedzieć, że przebieg mieszania zależy od warunków hydrodynamicznych przepływu. Proces mieszania w przepływie w rurze okrągłej opisuje równanie dyfuzji, którego rozwiązania dla różnych wariantów podano w monografii [13].

Rozwiązanie tego równania w cylindrycznym układzie współrzędnych, przy założeniu stałości współczynnika dyfuzji K_D i jednorodnego profilu prędkości w rurze, ma postać

$$c = \sum_1^{\infty} A_n I_0(a_n r_+) \exp\left(-\frac{a_n K_D}{R_2^2 U} x\right). \quad (1)$$

Stałe A_n i a_n określa się z warunków granicznych zadania. Na ścianie kanału mieszalnika jest

$$\left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0 \quad (2)$$

i warunek, z którego wyznacza się stałe a_n , sprowadza się do równania

$$I_1(a_n) = 0. \quad (3)$$

Stałe a_n są więc miejscami zerowymi funkcji Bessela pierwszego rodzaju, pierwszego rzędu.

Stałe A_n są wobec (3) określone zależnością

$$A_n = \frac{2}{I_0^2(a_n)} \int_0^1 r_+ f(r_+) I_0(a_n r_+) dr_+. \quad (4)$$

Jeśli funkcję $f(r_+)$, która określa rozkład stężenia w przekroju początkowym $x=0$, przyj-

miemy w postaci

$$f(r_+) = \begin{cases} c_1 & \text{dla } 0 \leq r_+ \leq \frac{R_1}{R_2}, \\ 0 & \text{dla } \frac{R_1}{R_2} < r_+ \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

to z (4) jest

$$A_n = 2c_1 \frac{R_1}{R_2} \frac{I_1\left(a_n \frac{R_1}{R_2}\right)}{a_n I_0^2(a_n)} \quad (6)$$

i zgodnie z (1) mamy

$$c = 2c_1 \frac{R_1}{R_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1\left(a_n \frac{R_1}{R_2}\right)}{a_n I_0^2(a_n)} I_0(a_n r_+) \exp\left(-\frac{a_n^2 K_D}{R_2^2 U} x\right). \quad (7)$$

Współczynnik K_D charakteryzuje przenoszenie w kierunku promieniowym i dla różniących się prędkości strumieni można przyjąć, że jest funkcją różnicy ich prędkości ($u_1 - u_2$). Jeśli oznaczymy jako $\varphi(x)$ funkcję ujmującą zmianę wzdłuż osi x burzliwości spowodowanej różnicą prędkości strumieni wynoszącą na wlocie ($u_1 - u_2$), to możemy przedstawić K_D w postaci

$$K_D = (u_1 - u_2) \varphi(x) + K(Re), \quad (8)$$

gdzie $K(Re)$ jest stałą określającą wartość K_D dla przepływu ustabilizowanego po wymieszaniu.

Jak widać, pominięto przy tym zmienność K_D wzdłuż współrzędnej radialnej.

Tak więc w zależności (7) jest ogólnie $K_D = \varphi(x)$. W szczególności zaś wystąpi w wykładniku w (7) czynnik w postaci $(u_1 - u_2)/U$. Jeśli przyjąć $U = u_1$ lub $U = u_2$, to wykładnik ten będzie funkcją stosunku prędkości strumieni na wlocie.

Jak już wspomniano, stężenie barwnika w strumieniu 1 zachowuje wartość c_1 jeszcze do pewnej odległości od wlotu, najdłużej na osi. Odpowiadającą temu odległość oznaczono na rysunku 1 jako x_1 . Można przypuszczać, że przekroczenie odległości x_1 (ewentualnie x_2 , jeśli $x_1 < x_2$, p. rys. 1) odpowiada osiągnięciu „reżimu regularnego” mieszania burzliwego, analogicznego do „reżimu regularnego”, występującego przy nieustalonym przewodzeniu ciepła w ciałach stałych (por. [10, s. 81]).

Wyprowadźmy teraz określenie stopnia wymieszania mieszaniny dwuskładnikowej. Niech czynniki 1 i 2 o ustalonych objętościowych natężeniach przepływu $\dot{V}_1$ i $\dot{V}_2$ różniących się w przekroju początkowym mieszalnika cechą addytywną (np. stężeniem barwnika), tzn. stężenia wynoszą c_1 i c_2 . Po zupełnym (idealnym) wymieszaniu stężenie wyniesie

$$c_M = c_1 \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_M} + c_2 \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_M}, \quad (9)$$

gdzie

$$\dot{V}_M = \dot{V}_1 + \dot{V}_2. \quad (10)$$

W stanach pośrednich, tj. między początkiem procesu i zupełnym wymieszaniem, w przekroju kanału mieszalnika będzie istniał rozkład stężenia. W dowolnym punkcie przekroju kanału i , a w praktyce w elementarnym strumieniu $\Delta \dot{V}_i = \Delta F u_i$ zwanym próbką, można określić stężenie c oraz odchylenie lokalne od stężenia c_M równe $\delta = (c - c_M)$. Jest przy tym

$$\bar{\delta} = \frac{1}{\dot{V}_M} \int_{F_M} (c - c_M) u dF = \frac{1}{\dot{V}_M} \int_{F_M} u dF = 0, \quad (11)$$

to znaczy odchylenie średnie dla strumienia jest równe zeru. W związku z tym przyjmijmy jako odchylenie średnie wielkość

$$\bar{\delta} = \int_{F_M} |c - c_M| \frac{u dF}{u_M F_M} \approx \sum_{i=1}^n |c_i - c_M| \frac{u_i dF_i}{u_M F_M} \quad (12)$$

oraz jako miarę stopnia wymieszania wielkość

$$I = 1 - \frac{\bar{\delta}}{\bar{\delta}_p}, \quad (13)$$

gdzie indeks p oznacza stan początkowy. Jak widać, na początku mieszania $I=0$ wobec $\bar{\delta}=\bar{\delta}_p$, natomiast dla całkowitego wymieszania jest $I=1$ wobec $\bar{\delta}=0$.

Dla okrągłej rury o średnicy $2R_2$ mamy

$$F_M = \pi R_2^2, \quad dF = 2\pi r dr, \quad (14)$$

więc oznaczając $r_+ = r/R_2$ możemy zapisać wzór (12) w postaci

$$\bar{\delta} = 2 \int_0^1 |c - c_M| \frac{U}{U_M} (r_+) dr_+. \quad (15)$$

Jeśli przez F_1 oznaczymy przekrój wewnętrznej rury, którym przepływa V_1 czynnika 1 o stężeniu c_1 , a przez F_2 przekrój kanału pierścieniowego otaczającego rurę wewnętrzną, którym przepływa V_2 czynnika 2 o stężeniu c_2 (rys. 1), to w przekroju początkowym mieszalnika, wobec (9) i (10), mamy po prostych przekształceniach

$$\bar{\delta}_p = 2 \frac{\dot{V}_1 \dot{V}_2}{\dot{V}_M^2} |c_1 - c_2| \quad (16)$$

i dalej z wzoru (13) wobec (15)

$$1 - I = \frac{(\dot{V}_1 + \dot{V}_2)^2}{\dot{V}_1 \cdot \dot{V}_2} \int_0^1 \frac{|c_1 - c_M|}{|c_1 - c_2|} \frac{U}{U_M} dr_+. \quad (17)$$

Jeśli w ostatniej zależności podstawimy c z zależności (7) i wykonamy całkowanie, to wynik możemy zapisać, zachowując tylko pierwszy człon szeregu występującego w (7), w formie zależności

$$1 - I = \text{const} \left[\exp \left(- \frac{a_1^2}{R_2^2} \frac{K_D}{U} x \right) \right], \quad (18)$$

w której stała zależy od stosunku (R_1/R_2) oraz stężeń c_1 i c_2 . Całość przedstawionego wywodu można więc podsumować następująco:

1. Wyniki badań przebiegu mieszania w mieszalniku przepływowym należy przedstawić w postaci wykresów we współrzędnych

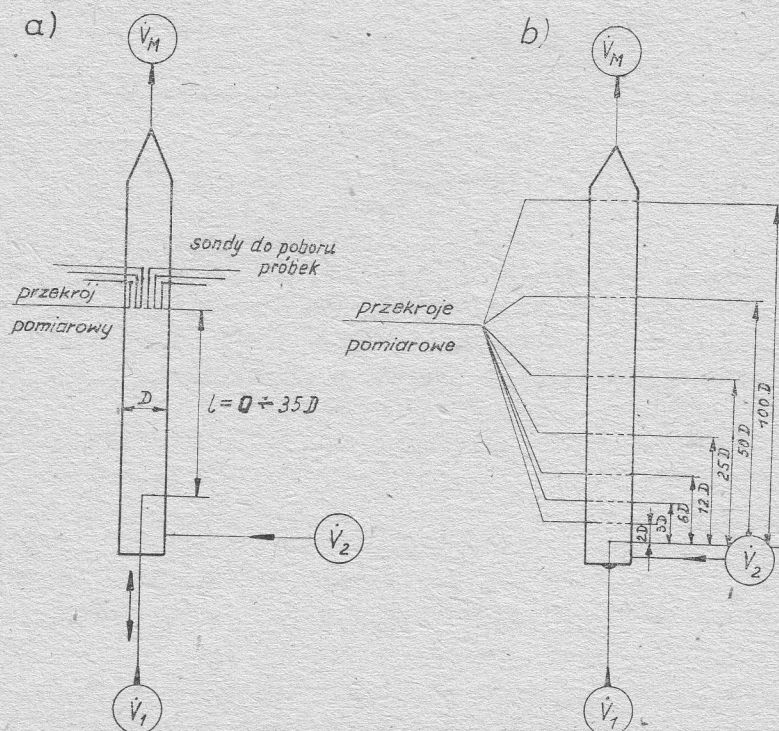
$$y = \ln(1 - I), \quad x_+ = \frac{x}{R_2} = \frac{l}{D}.$$

2. Punkty obrazujące wyniki pomiarów będą układać się w podanych współrzędnych w liniach, które w zakresie reżimu regularnego mieszania będą liniami prostymi, o nachyleniu do poziomu rosnącym ze wzrostem różnicy prędkości na wlocie, a więc ze wzrostem stosunku prędkości $u_p = u_1/u_2$.

Wnioski te są wyjaśnieniem i uzasadnieniem wyników badań przedstawionych w [8 i 9].

3. Stanowisko eksperymentalne

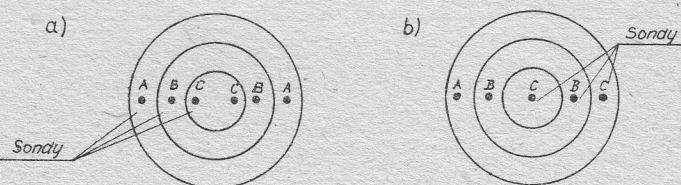
Schemat ideowy stanowiska eksperymentalnego przedstawiono na rysunku 2. Zasadniczym elementem jest tu mieszalnik typu rura w ruchu, składający się z płaszcza zewnętrznego w postaci rury o średnicy wewnętrznej D oraz rury wewnętrznej o średnicy d . Mieszane



Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska do badania mieszania cieczy w przepływie; a) dla wody, b) dla olejów

czynniki płyną odpowiednio: czynnik 1 kanałem wewnętrznym oraz czynnik 2 kanałem pierścieniowym między płaszczem zewnętrznym oraz zewnętrzną stroną kanału wewnętrznego.

W badaniach przy użyciu wody zastosowano przesuwana wzdłuż osi kanału rurę wewnętrzną, co umożliwiało dowolne nastawianie odległości wlotu od ustalonego oprzyrządowanego przekroju pomiarowego. W badaniach przy użyciu oleju (rys. 2b) przeprowadzonych na większym stanowisku nie było to możliwe, wobec czego oprzyrządowano



Rys. 3. Szkic do ilustracji sposobu obliczania stopnia wymieszania I ; a) dla wody, b) dla olejów

$$F_M = \Delta F_A + \Delta F_B + \Delta F_C$$

$\Delta F_A / F_M = 0,183$	$\Delta F_A / F_M = 0,047$
$\Delta F_B / F_M = 0,298$	$\Delta F_B / F_M = 0,377$
$\Delta F_C / F_M = 0,519$	$\Delta F_C / F_M = 0,576$

siedem wybranych przekrojów pomiarowych, ostatni w odległości $100D$ od wlotu. Na stanowisku do badań z wodą maksymalna odległość od wlotu wynosiła $35D$. W przekrojach pomiarowych zainstalowano sondy do poboru próbek, wykonane z cienkich rurek o średnicach wewnętrznych ok. 1 mm, przy czym dla badań z wodą przekrój wyposażono dodatkowo w termopary, wprowadzone przez rurki sond. Rozmieszczenie sond w przekrojach pomiarowych pokazano na rysunku 3. Natężenie przepływów mierzono rotametrami, zainstalowanymi na dopływach.

Bardziej szczegółowy opis stanowisk zawarty jest w [17 i 18]. W przypadku mieszania strumieni wody różniły się one temperaturą lub barwą, tzn. strumień 1 był podgrzany lub barwiony, natomiast w badaniach mieszania olejów wykorzystano różnicę współczynników przenikania światła w dobranym pasmie absorpcji. Stężenie barwnika w poszczególnych próbkach wyznaczano za pomocą pomiaru współczynnika transmisji światła w maksimum pasma absorpcji roztworu. Jako barwnika użyto eozyny żółtawej. Współczynnik transmisji światła mierzono spektrokolorymetrem Spekol. Do pomiaru temperatur użyto termopar płaszczowych NiCr-Ni o średnicy płaszcza 0,3 mm.

4. Wyznaczenie stopnia wymieszania

Określenie stopnia wymieszania wymaga jednoczesnych pomiarów rozkładu stężeń i prędkości co w praktyce jest kłopotliwe.

Definicję stopnia wymieszania można uprościć zakładając, że w pewnej odległości od początku mieszania profil prędkości jest jednorodny, co sprowadza się do równości

$$U = U_M \quad (19)$$

oraz

$$I = 1 - \frac{U_M \int_{FM} |c - c_M| dF}{|c_1 - c_M| \dot{V}_1 + |c_2 - c_M| \dot{V}_2} \quad (20)$$

Ponieważ $U_M = \dot{V}_M / F_M$, to

$$I = 1 - \frac{\int |c - c_M| \frac{dF}{F_M}}{|c_1 - c_M| \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_M} + |c_2 - c_M| \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_M}} \approx 1 - \frac{\sum_i |c_i - c_M| \frac{\Delta F_i}{F_M}}{|c_1 - c_M| \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_M} + |c_2 - c_M| \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_M}} \quad (21)$$

Tak uproszczony stopień wymieszania obliczony jest z pewnym błędem, tym większym im bliżej przekroju wlotowego znajduje się przekrój badany i nie przyjmuje on w przekroju wlotowym wartości zero. Nie jest to istotne dla praktyki, gdyż odcinek początkowy procesu mieszania jest krótki. Można wprowadzić również nieco inne określenie stopnia wymieszania, bez uwzględnienia profilu prędkości [14].

W definicji stopnia wymieszania wielkość c jest stężeniem barwnika lub inną cechą strumienia, która jest proporcjonalna do stężenia, np. temperaturą. Do opracowania wyników pomiarów posłużyła uproszczona postać stopnia wymieszania według (21).

Przekrój poprzeczny podzielono na trzy koncentryczne części (rys. 3), odpowiadające umieszczeniu sond. Wartość stężenia (lub temperatury) dla poszczególnych części powierzchni ΔF_i określono jako średnią arytmetyczną ze wskazań sond (lub termopar) przynależnych do tej części powierzchni.

5. Wyniki pomiarów

Na wykresach (rys. 4÷11) przedstawiono wyniki pomiarów dla wody i dla olejów, w formie zależności średniego odchylenia od jednorodności $(1 - I)$ od bezwymiarowej odległości od wlotu l/D . Jak widać, dla wody wyniki można przybliżyć prostymi w skali półlogarytmicznej w całym zakresie mieszania. Dla olejów pod koniec mieszania występuje odchylenie od prostych w podanym układzie. Parametrem dla poszczególnych prostych jest stosunek prędkości mieszanych strumieni w przekroju początkowym $u_p = u_1/u_2$.

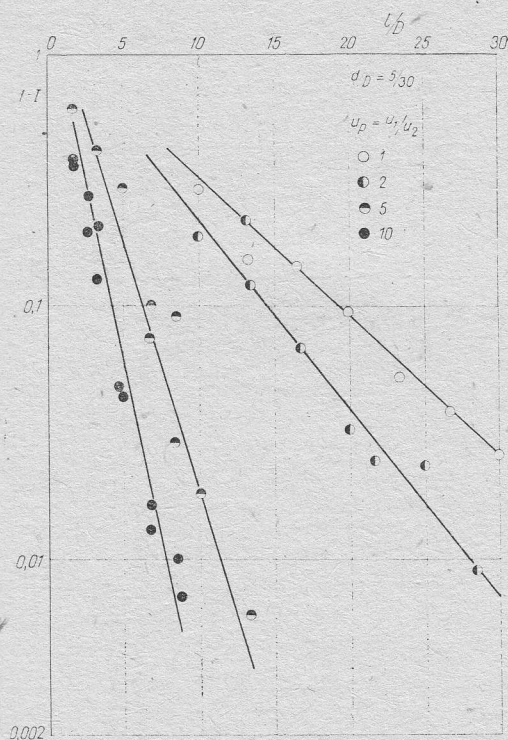
Zakres zmian parametrów $u_p = u_1/u_2$ i d/D objęty badaniami wynika z tabeli I, w której zestawiono wartości współczynników nachylenia prostych k w układzie $(\ln(1 - I); l/D)$, tzn.

Tabela I

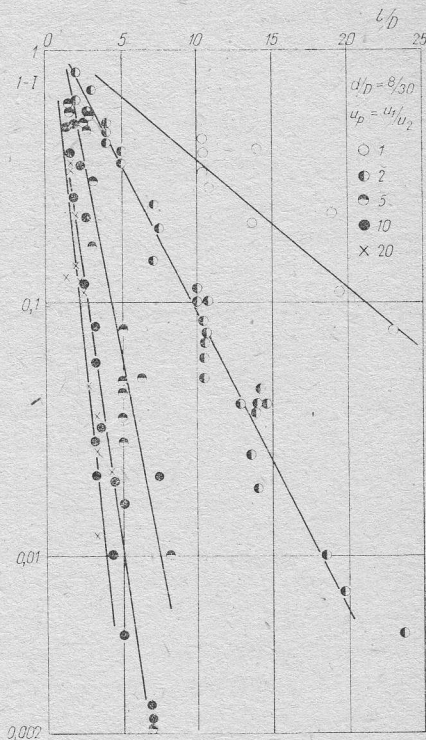
Wartości współczynników k nachylenia prostych

Czynnik		Woda					Olej*
u_p	d/D	5/30	8/30	10,7/30	13,7/30	17/30	32/53
1		0,13	0,12	0,20	0,18	0,17	—
2		0,17	0,27	0,40	0,35	0,47	0,38
5		0,45	0,71	0,85	0,85	0,69	0,66
10		0,67	0,94	0,90	0,90	0,75	0,96
20		—	1,44	—	—	—	—

* Dla prostych odpowiadających początkowemu przebiegowi mieszania.



Rys. 4. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni wody, $d/D=5/30$



Rys. 5. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni wody, $d/D=8/30$

$$k = - \frac{\ln(1-I)}{\frac{l-l_0}{D}} \quad (22)$$

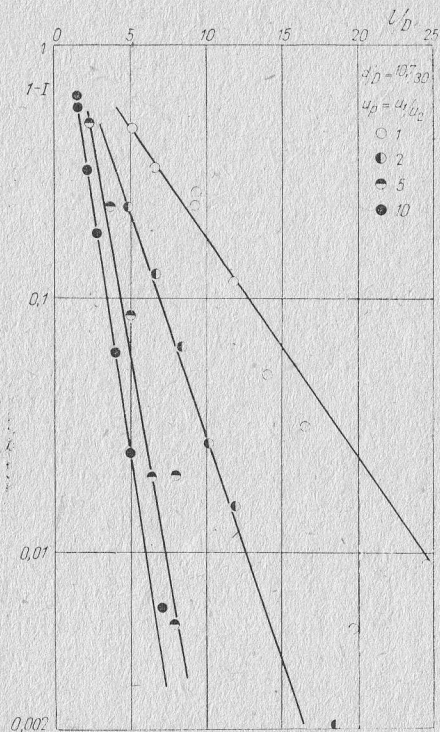
Proste obrazujące przebieg mieszania w podanym układzie nie przechodzą przez początek układu, lecz przecinają oś $\ln(1-I)=0$ w odległości l_0 od niego. Liczba Reynoldsa mieszaniny zmieniała się w przedziale $Re_M=(1 \div 20) \cdot 10^3$ dla wody i $Re_M=(2,5 \div 30) \cdot 10^3$ dla olejów. Zakres zmian lepkości mieszaniny olejów wynosił $\nu=(1 \div 24) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

W [9] zaproponowano parametr uogólniający wyniki badań mieszania cieczy w mieszalniku strumieniowym

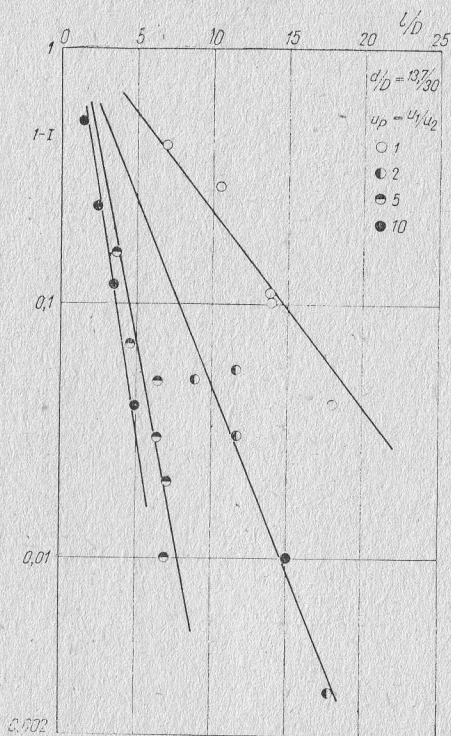
$$\alpha = \sqrt{\frac{\dot{p}_1}{\dot{p}_M}}, \quad (23)$$

który dla $\rho_1=\rho_2=\rho_M$ można przekształcić do postaci

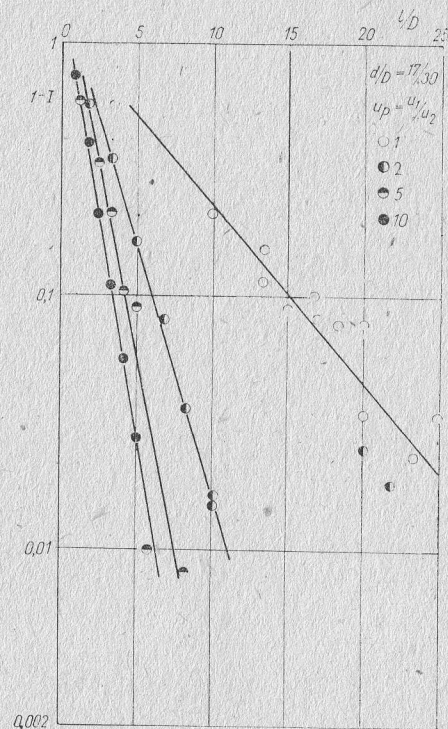
$$\alpha = \frac{u_p \frac{D}{d}}{u_p + \left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \quad (24)$$



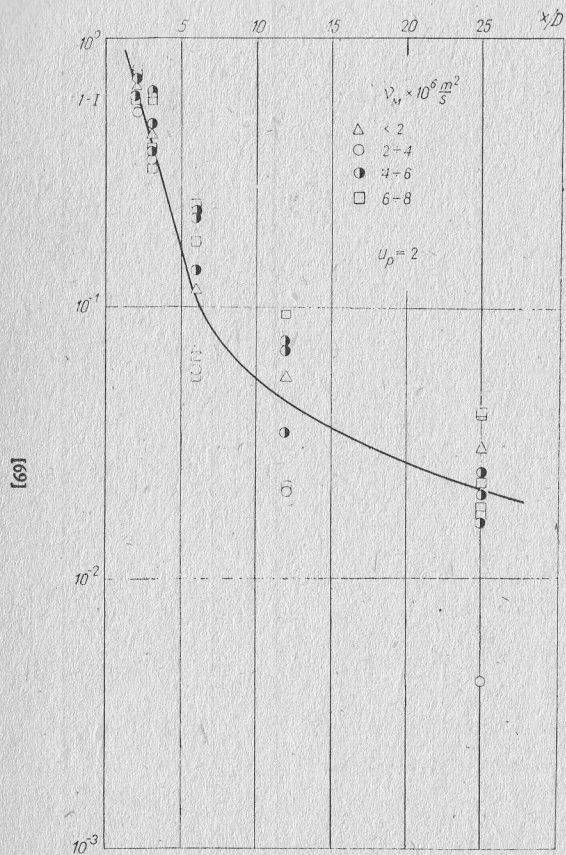
Rys. 6. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni wody, $d/D = 10,7/30$



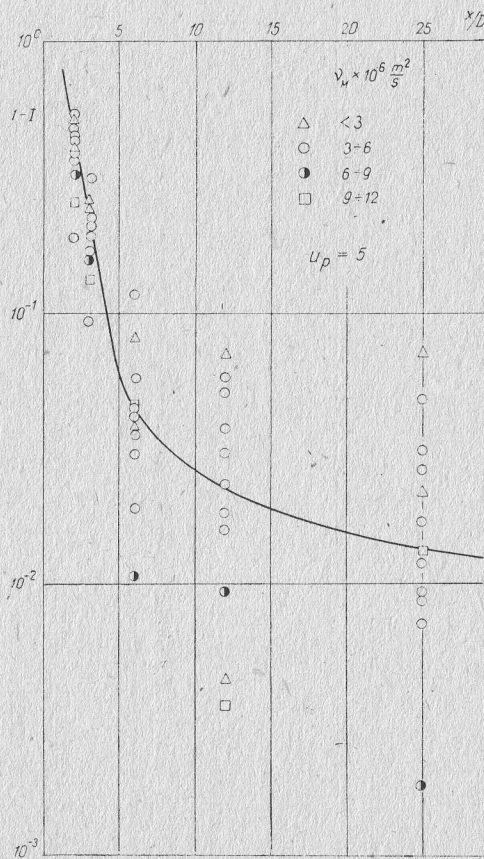
Rys. 7. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni wody, $d/D = 13,7/30$



Rys. 8. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni wody $d/D = 17,7/30$



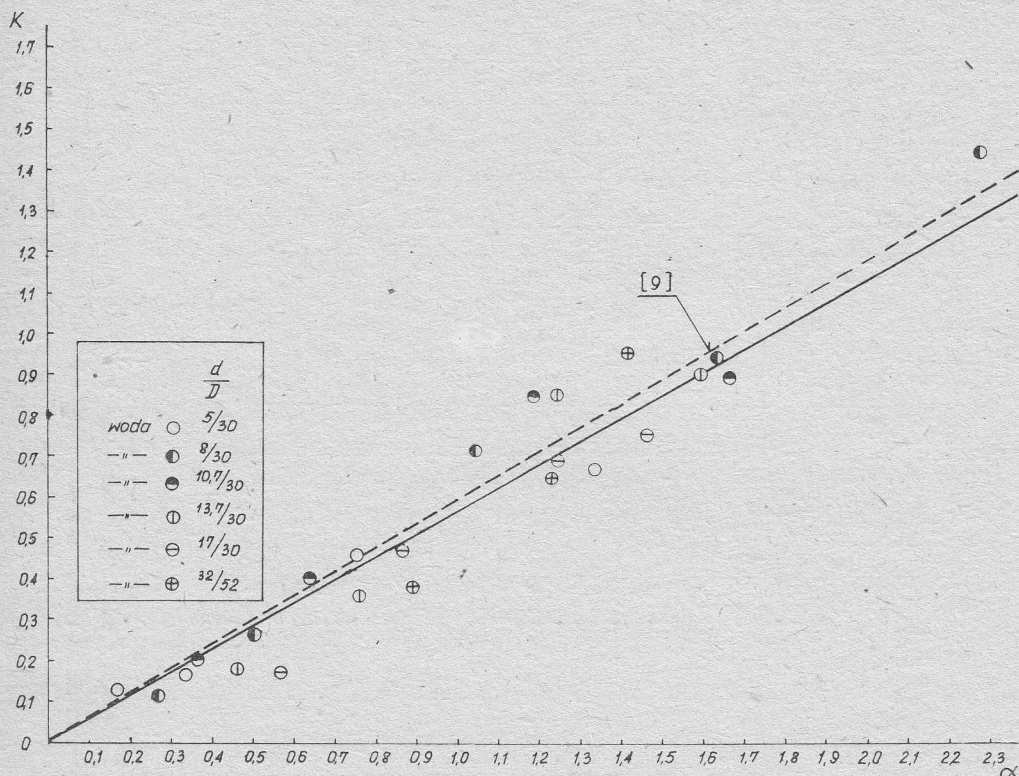
Rys. 9. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni olejów $u_p = 2$



Rys. 10. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni olejów $u_p = 5$



Rys. 11. Zależność stopnia wymieszania I od odległości od wlotu l/D dla dwóch strumieni olejów $u_p = 10$

Rys. 12. Zależność współczynnika k (wg (25)) od parametru α

Opisane w [9] pomiary przeprowadzono dla cieczy o lepkościach w przybliżeniu równych lepkości wody i dla stosunkowo wąskiego zakresu zmian d/D . Opracowano je wprowadzając stopień wymieszania podobny do użytego w niniejszej pracy.

Inny sposób uogólnienia wyników badań mieszania w mieszalnikach strumieniowych zaproponowano w [15], jednak jest on przydatny tylko w przepływach z cyrkulacją, która nie zawsze występuje [16]. W tabeli II przedstawiono wartości parametru $\sqrt{\dot{p}_1/\dot{p}_M}$ odpowiadające wariantom u_p i d/D z tabeli I, a zależność współczynnika nachylenia k według (22) od tego parametru przedstawiono na rysunku 12. Łatwo można zauważyć, że proste $k=k(\alpha)$ otrzymane przez nas i w [9] są bardzo bliskie.

Tabela II

Wartość parametrów $\dot{p}_1/\dot{p}_M$

d/D u_p	5/30	8/30	10,7/30	13,7/30	17/30	32/53
1	0,1667	0,2667	0,3567	0,4567	0,5667	—
2	0,3243	0,4979	0,6328	0,7557	0,8579	0,8849
5	0,7500	1,0381	1,1819	1,2449	1,2403	1,2281
10	1,333	1,6260	1,6629	1,5874	1,4567	1,4104
20	—	2,2684	—	—	—	—

6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań mieszania cieczy w przepływowym mieszalniku strumieniowym można stwierdzić, co następuje:

1. Wyniki badań przebiegu mieszania na wykresie o współrzędnych $(\ln(1-I), l/D)$ układają się wzdłuż linii prostych, z wyjątkiem niewielkiego odcinka początkowego l_0 o długości rzędu $(0 \div 2) D$. Oznacza to, że współczynnik przenoszenia masy występujący w wykładniku w równaniu (7) można uważać za stały w zakresie regularnego reżimu mieszania, a nadto potwierdza fakt, że procesy przenoszenia masy, pędu i ciepła są analogiczne.

2. Odchylenie od linii prostej obrazujące stopniowy spadek wartości wykładnika k występuje podczas mieszania olejów. Zakres zmienności stopnia wymieszania odpowiadający stałości wykładnika k , a więc według prostej, maleje ze spadkiem stosunku prędkości u_p (rys. 9÷11). Można stwierdzić występowanie zakresu mieszania z przeważającym wpływem działania różnicy prędkości strumieni, przy czym zakres ten jest tym mniejszy, im mniejsza jest różnica prędkości. W zakresie tym obowiązują zależności identyczne jak dla mieszania strumieni wody. Oznacza to, że proces mieszania nie zależy w tym zakresie od rodzaju czynników, natomiast rodzaj czynnika wpływa na wielkość opisanego zakresu w sensie długości odcinka kanału, na którym decydujące znaczenie ma różnica prędkości strumieni. Dalej wzdłuż przepływu zaczynają odgrywać coraz większą rolę własności mieszanych czynników.

Sprawa ta, niezwykle interesująca, wymaga bliższego wyjaśnienia w trakcie dalszych badań.

3. Wyniki uzyskane dla stosunku prędkości $u_p=1$ można porównać z rezultatami zawartymi w [8]. Wartości współczynnika k (nachylenie prostej na wykresie) zmieniło się w [8] w przedziale $k=0,035 \div 0,40$, w naszych badaniach stwierdzono $k=0,039$.

Uogólnienie wyników, w tym również dla $u_p=1$, stanowi rysunek 12. Wynika z niego, że parametr α użyty w [9] do opracowania rezultatów badań z dobrym przybliżeniem koreluje także nasze wyniki.

4. Stosunkowo szeroki zakres zmian parametrów objęty badaniami daje podstawy do stwierdzenia, że można oprzeć się na uzyskanych zależnościach przy projektowaniu przepływowych mieszalników strumieniowych. Z drugiej strony znajomość zależności opisujących przebieg mieszania umożliwia przeprowadzenie porównania innych mieszalników przepływowych z mieszalnikiem strumieniowym. Zależności opisującej przebieg mieszania w mieszalniku strumieniowym można nadać postać

$$I = 1 - e^{-k \frac{l-l_0}{D}}, \quad (25)$$

gdzie $k = 0,57 \sqrt{\dot{p}_1/\dot{p}_M}$, $l_0 \cong 2D$.

Praca wpłynęła do Redakcji w marcu 1979 r.

Literatura

- [1] F. Stręk, *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa 1971.
- [2] G. N. Abramovic, *Teorija turbulentnych struj*. Gos. Izd. Fiz. Mat. Literatury, Moskwa 1960.
- [3] Shih i Pai, *Fluid Dynamics of Jets*. D. Van Nostrand Co. Inc., Toronto-New York-London 1954.

- [4] J. Madejski, *Influence of the Nozzle Diameter on the Hydrodynamic Structure of Turbulent Free Jets*. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. tech., Vol. XXIV, No. 1 — 1976, s. 71.
- [5] E. Razinsky, J. A. Brighton, *Confined Jet Mixing for Nonseparating Conditions*. Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Ser. D, Vol. 93, No. 3, September 1971, s. 333.
- [6] H. H. Bruun, *A time-domain analysis of the large-scale flow structure in a circular jet*. J. Fluid Mech. (1977), Vol. 83, part 4, s. 641.
- [7] *Aerodinamika zakrúcennoy strui* pod red. R. B. Achmedova, Energija, Moskwa 1977.
- [8] J. W. Hiby, *Mischung in turbulenter Rohrströmung*. Verfahrenstechnik 4, Nr. 12, 1970, s. 538.
- [9] K. H. Hartung, J. W. Hiby, *Beschleunigung der turbulenten Mischung in Rohren*. Chemie-Ing. Techn. 44 Jahrg. Nr. 18, 1971, s. 1051.
- [10] J. Madejski, *Teoria wymiany ciepła*. PWN, Warszawa — Poznań 1963.
- [11] J. Mościcka, *Wpływ struktury burzliwego pola przepływu w rurze na lokalne współczynniki wymiany ciepła i masy*. Chemia stosowana, seria B, tom VII, z. 1, 1970, s. 131.
- [12] M. Kappel, *Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Messung, des Mischungsverlaufs bei Flüssigkeiten*. Dissertation, TU München 1976.
- [13] W. Jost, *Diffusion in Solids, Liquids, Gases*. Academic Press Inc., Publishers: New York.
- [14] B. Grochal, *Wyznaczenie przebiegu mieszania w mieszalniku przepływowym na podstawie zmienności przybliżonego (powierzchniowego) stopnia wymieszania*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 63/937/79.
- [15] H. J. Henzler, *Untersuchungen zum Homogenisieren von Flüssigkeiten oder Gasen*. VDI-Forschungsheft 587.
- [16] J. T. Exley, J. A. Brighton, *Flow-Separation and Reattachment in Confined Jet Mixing*. J. of Basic Engineering, Trans. ASME, June 1971, s. 192.
- [17] B. Grochal, A. Jezierski, E. Śliwicki, W. Tarasewicz, *Badania mieszania cieczy w mieszalniku przepływowym typu strumienicy*. Oprac. zew. IMP PAN Gdańsk, nr arch. 148/77.
- [18] A. Jezierski, E. Śliwicki, W. Tarasewicz, *Koncepcja, założenia i projekt wstępny stanowiska do badań mieszania w przepływie cieczy różniących się lepkością*. Oprac. zew. IMP PAN Gdańsk, nr arch. 254/77.

Смешивание жидкости в струйном миксере

Резюме

В работе представлены результаты смешивания двух потоков воды и двух потоков дизельного масла в струйном миксере в относительно широком диапазоне изменений параметров. Зависимость отклонения от однородности $1-I$ от безразмерного расстояния от входа l/D можно аппроксимировать прямыми в полупологарифмическом масштабе.

С целью обобщения результатов применен параметр $\alpha = \sqrt{\dot{p}_1/\dot{p}_M}$ предложенный в [9] и, как оказалось, хорошо коррелирующий коэффициент наклона этих прямых. Это позволило вывести обобщенную зависимость, описывающую ход смешивания в струйном миксере.

Mixing of Liquids in a Jet Mixer

Summary

The paper concerns investigations of mixing of two jets of water and two jets of diesel oil in a jet mixer. Results obtained for a relatively wide range of parameters are given. The dependence of the deviation from homogeneity $1-I$ on the nondimensional distance from the inlet l/D can be approximated with straight lines in a semilogarithmic coordinate system.

A general relation describing the process of mixing in a jet mixer was obtained based on the parameter $\alpha = \sqrt{\dot{p}_1/\dot{p}_M}$ [9] which proved to provide good correlation of slopes of the straight lines.