

Kazimierz KOZIOŁ

Piotr GŁOWACKI

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej
Politechnika PoznańskaANALIZA CZYNNIKÓW WARUNKUJĄCYCH WYSTĄPIENIE EFEKTU
TOMSA

Streszczenie: W pracy przeanalizowano koncepcje różnych autorów dotyczące czynników warunkujących wystąpienie efektu Tomsa. Stwierdzono, że istniejące hipotezy mają wyłącznie charakter jakościowy i nie korelują dostępnych danych empirycznych. Zaproponowano własny parametr krytyczny określający początek zjawiska hydrodynamicznego oddziaływania polimerów.

Zjawisko redukcji turbulentnych oporów przepływu roztworów polimerów posiada bogatą bibliografię [1 - 3], znanych jest również szereg jego zastosowań praktycznych. Do chwili obecnej brak jest jednak dostatecznie pełnej analizy czynników warunkujących wystąpienie efektu Tomsa. Stwarza to dużą dozę niepewności w trakcie projektowania instalacji przepływowych, wykorzystujących efekt redukcji oporów hydraulicznych. Przypadkowy, nie oparty na podstawach naukowych, dobór parametrów hydrodynamicznych i własności molekularnych stosowanych dodatków polimerowych uniemożliwia ponadto osiągnięcie maksymalnej, sięgającej 80% obniżki strat energetycznych.

Według Hershey'a i Zakina [4] warunkiem uzyskania efektu Tomsa jest przekroczenie krytycznej wartości liczby Reynoldsa - Re_c . Wartość jej zależy nie tylko od rodzaju polimeru i jego koncentracji w roztworze, ale również w niewielkim stopniu od średnicy rury

$$Re_c \sim d^{1.1} \quad (1)$$

Zaproponowany w pracy [4] parametr krytyczny Re_c jest niedogodny, a jego przyjęcie nie ma wystarczającego uzasadnienia teoretycznego. Wartość liczby Reynoldsa nie mówi bowiem nic o charakterze przepływu przyściennego, w którym oddziaływanie polimeru jest najsilniejsze.

Dla przepływów w rurach gładkich krytyczną wartość liczby Reynoldsa - Re_c można zastąpić bardziej adekwatnym parametrem - krytycznym naprężeniem stycznym na ścianie $\tau_{w,c}$. W tym celu empiryczny związek (1) należy zastąpić przybliżonym równaniem:

$$Re_c = C^{\frac{8}{7}} d_c, \quad (2)$$

gdzie parametr C zależy od rodzaju polimeru i jego koncentracji w płynie.

Korzystając z równania Blasiusa uzyskuje się związek obu parametrów

$$\tau_w = \frac{\rho v^2}{25} \left(\frac{Re}{d} \right)^{\frac{7}{8}} \quad (3)$$

Z porównania zależności (2) i (3) wynika, że w warunkach krytycznych, w których rozpoczyna się efekt obniżenia oporów przepływu płynów, słuszne jest równanie :

$$\tau_{w,c} = \frac{\rho v^2}{25} C^{\frac{7}{4}} \quad (4)$$

Progowa wartość naprężenia stycznego na ścianie - $\tau_{w,c}$ zależy jedynie od własności fizykochemicznych transportowanego płynu. Ostatecznie warunek redukcji oporów podczas turbulentnych przepływów w rurach ma postać :

$$\tau_w = \frac{\rho v^2}{25} Re^{-0,25} \geq \tau_{w,c} \quad (5)$$

Naprężenie styczne na ścianie wiąże się z innym parametrem - prędkością dynamiczną - w^*

$$w^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Na podstawie danych empirycznych [5] dotyczących przepływów burzliwych w rurach można przyjąć, że w obszarze strefy buforowej spełniona jest przybliżona zależność :

$$w^* \approx w_y^* \quad (7)$$

Ponieważ obecność polimerów w strefie buforowej jest warunkiem koniecznym wystąpienia efektu Tomsa, wynika stąd, że krytyczna wartość w_y^*

może być parametrem określającym początek hydrodynamicznego oddziaływania polimerów na przepływ turbulentny [6]. Potwierdziła to również analiza rezultatów własnych badań eksperymentalnych. Nowy parametr $w'_{y,c}$ odpowiada koncepcjom szeregu badaczy [7,10], w których warunki hydrodynamiczne określające początek efektu Tomsa są ściśle związane z intensywnością i strukturą turbulencji przyściennej. Pogląd ten wydaje się bardziej trafny od hipotezy Astarity [11], zakładającej iż dodatek polimerów wywołuje spadek dyssypacji energii turbulentnej w całym polu przepływu płynów.

W tabeli 1 zestawiono proponowane w literaturze parametry hydrodynamiczne warunkujące redukcję oporów przepływu płynów.

Szersze potraktowanie zagadnienia wymaga znajomości zarówno parametrów hydrodynamicznych, jak i własności molekularnych stosowanych dodatków polimerowych. W analizach teoretyczno - doświadczalnych jako warunek redukcji oporów zakłada się dodatkowo współmierność :

- rozmiarów geometrycznych [6,10]

$$2R_G W_d = C_L \quad (8)$$

- czasów charakterystycznych [13]

$$\Theta \frac{w^*}{y}^2 = C_t \quad (9)$$

- strumieni energetycznych [15]

$$H = \frac{8 C_p M^r [\eta]^2 T_{w,c}}{R_g T} > H_c \quad (10)$$

W tabeli 2 przedstawiono, na podstawie danych zawartych w pracy [15], przedział wartości stałych empirycznych : C_L , C_t , H_c , uzyskanych przez różnych autorów.

Tabela 2. Zestawienie wartości charakterystycznych stałych C_L , C_t oraz H_c [15].

Stała	Przedział wartości uzyskanych przez różnych autorów	Średnia wartość stałej [15]	Odchylenie standardowe stałej [15]
C_L	0,0004 + 0,0222	0,0032	0,0038
C_t	0,0173 + 46,0	4,35	8,72
H_c	0,001 + 85,0	14,4	18,8

Tabela 1. Zestawienie proponowanych w literaturze parametrów hydrodynamicznych warunkujących wystąpienie efektu Tomsa. [6]

LP.	Charakterystyczny parametr krytyczny	Wzór	Wymiar	Źródło
1	Liczba Reynoldsa	$Re_c = \frac{v d}{\nu}$	-	[4] [7]
2	Liczba Karmana	$Re_c \sqrt{\lambda}_c$	-	[12]
3	Szybkość ścinania na ścianie	$\dot{\gamma}_{w,c}$	s^{-1}	[12]
4	Naprężenie styczne na ścianie	$\tau_{w,c}$	N/m^2	[5] [11]
5	Prędkość dynamiczna	w_c^*	m/s	[5]
6	Liczba falowa	$(w^*/\nu)_c$	m^{-1}	[2] [5] [10]
7	Dyssypacyjna liczba falowa	$0,2 (w^*/\nu)_c$	m^{-1}	[13]
8	Charakterystyczny czas przyścienny	$(\tau/\tau_w)_c$	s	[14]
9	Częstotliwość wirów przyściennych	$(w_y^*/l_t)_c$	s^{-1}	[8]
10	Częstotliwość wirów dysypacyjnych	$(w^{*2}/\nu)_c$	s^{-1}	[2] [5] [9] [13]
11	Najmniejsza częstotliwość wirów dysypacyjnych	$(\frac{\nu}{d} Re_{0,75})_c$	s^{-1}	[11]
12	Składowa pulsacyjna prędkości w kierunku prostopadłym do ściany rury, w obszarze strefy buforowej	$w_{y,c}^*$	m/s	[6]

Dla wszystkich trzech hipotez rozrzut punktów doświadczalnych jest tak duży, że dokonane przez Kohna obliczenia wartości średnich i odchyłeń standardowych, zestawione w tabeli 2, nie odpowiadają zasadom analizy statystycznej. Przedstawione rezultaty wskazują, że żadna z proponowanych hipotez (8 - 10) nie znalazła wystarczającego potwierdzenia doświadczalnego. Wydaje się godne podkreślenia, że proponowane koncepcje mają charakter ściśle jakościowy i nie uwzględniają widmowego rozkładu wielkości struktur dyssypacyjnych, widmowego rozkładu mas cząsteczkowych polimerów oraz zmian konformacji polimerów w przepływach z gradientem prędkości, co wskazuje na konieczność prowadzenia dalszych prac w tym zakresie.

Niniejsza praca wykonywana była w ramach Problemu Międzyresortowego MR-I-10 pt. "Optymalizacja procesów termodynamicznych i przepływowych".

Oznaczenia :

d	- średnica rurociągu	m
v	- średnia objętościowa prędkość przepływu	m/s
w^*	- prędkość dynamiczna	m/s
w_y^*	- średnia kwadratowa wartość składowej pulsacyjnej prędkości w kierunku prostopadłym do ściany rury	m/s
σ^*	- parametr w równaniu (4)	$m^{-8/7}$
C_L	- stała w równaniu (8)	
C_p	- koncentracja masowa polimeru	kg/m ³
C_t	- stała w równaniu (9)	
H	- stała w równaniu (10)	
M^*	- masa molowa polimeru	kg/kmol
R_g	- uniwersalna stała gazowa	J/kmol K
R_G	- promień bezwładności molekuly	m
T	- temperatura bezwzględna	K
$[\eta]$	- graniczna liczba lepkościowa	m ⁻¹
$[\eta]$	- graniczna liczba lepkościowa	m ³ /kg
ν	- kinematyczny współczynnik lepkości	m ² /s
ρ	- gęstość	kg/m ³
τ_w	- naprężenie styczne na ścianie	N/m ²
Θ	- molekularny czas relaksacji naprężeń	s

Indeksy

c - oznacza wartość krytyczną warunkującą wystąpienie efektu Tomsa.

Literatura

- [1] Hoyt I.W.; Trans. A.S.M.E., Series D, 94, 258 (1972).
- [2] Lumley I.L.; Macromolecular Reviews, 7, 263 (1973).
- [3] Patterson G.K., Zakin J.L., Rodriguez I.M.; Ind. Eng. Chem., 61, 22 (1969).
- [4] Hershey H.C., Zakin J.L.; Ind. Eng. Chem. Fund., 6, 381 (1967).
- [5] Virk P.S., Merrill E.W., Viscous Drag Reduction, 107, Plenum Press New York 1969.
- [6] Głowacki P.; Praca doktorska, Poznań 1983.
- [7] Goren Y., Norbury I.F.; Trans. A.S.M.E., Series D, 89, 814 (1967).
- [8] Davies J.T.; Turbulence Phenomena, Academic Press, New York 1972.
- [9] Gordon R.I.; Nature, 227, 599 (1970).
- [10] Virk P.S.; J. Fluid Mech., 45, 417 (1971).
- [11] Astarita G., Greco G., Nicodemo L.; A.I.Ch.E. Journal, 15, 564 (1969).
- [12] Ram A., Finkelstein E., Elata C.; Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Develop., 6, 309 (1967).
- [13] Virk P.S., i inni; J. Fluid Mech., 30, 305 (1967).
- [14] Gustavsson L.H.; Phys. Fluids, 20, 120 (1977).
- [15] Kohn M.C.; J. Polym. Sci., Polym. Phys., 11, 2339 (1967).
- [16] Kozioł K. i inni; "Optymalizacja procesów termodynamicznych i przepływowych" Raport Nr 5, (1981).

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВЫСТУПЛЕНИЯ ЭФФЕКТА ТОМСА

Резюме

В работе представлен обзор полученных до сих пор результатов исследований условий возникновения эффекта Томса. Определено, что выступает большой разброс между представленными в литературе теориями и экспериментальными. Предложено новый параметр описывающий процесс.

ANALYSIS VARIABLES WHICH INFLUENCE THE ONSET OF DRAG REDUCTION

S u m m a r y

An overview of experimental and theoretical investigations on the onset of drag reduction in the turbulent flow of dilute polymer solutions was presented. It was concluded there is still no satisfactory theory which correlate all drag reducing onset data. A new, physically motivated parameter has been proposed.