

Marek DZIUBIŃSKI, Piotr DOMAGALSKI

e-mail: dziubin@wipos.p.lodz.pl

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Wpływ prędkości przepływu oraz właściwości cieczy na mechanizm ogniskowania strugi cieczy w węźle mikrokanalów

Wprowadzenie

Jednym z szeroko stosowanych zjawisk w urządzeniach *Lab-on-a-Chip* jest hydroogniskowanie cieczy (*hydrodynamic focusing*). Jest to zjawisko polegające na zwężeniu jednego ze strumieni cieczy przepływających w węźle mikrokanalów, przekształcając go za pomocą strumieni bocznych w strumień o żądanej konfiguracji geometrycznej. Idea tego zjawiska przedstawiona jest schematycznie na rys. 1.

Hydrodynamiczne ogniskowanie strugi znalazło szerokie zastosowanie w analizie medycznej, mikromieszaniu, mikroreaktorach, mikroreologii, produkcji emulsji oraz w wizualizacji przepływu w skali mikro jako modyfikacja techniki *micro-PIV* [1–3]. W celu rozwiązania niedogodności związanych z ograniczeniami klasycznego systemu optycznego, zaproponowano wprowadzenie znaczników do analizowanego przepływu w postaci cienkiej laminarnej warstwy uzyskanej za pomocą hydrodynamicznego ogniskowania. Wizualizacja przepływu w całym przekroju poprzecznym kanału wymaga zmiany położenia ogniskowanej strugi. Jest to możliwe dzięki ogniskowaniu prowadzonemu za pomocą dwóch niejednakowych strumieni bocznych. Zmieniając stosunek natężeń przepływu dopływów bocznych można sterować położeniem ogniskowanej strugi.

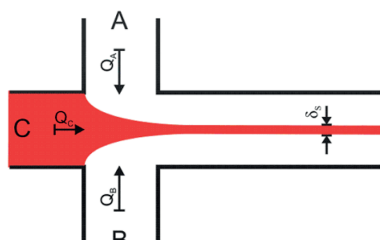
Złożoność hydrodynamiki ogniskowania strugi cieczy w mikrokanalach została opisana w wielu pracach, m.in. [4, 5]. Opublikowane wstępne badania wykonane zostały wyłącznie dla przepływu wody w węźle mikrokanalów i co ciekawe nie uwzględniają trójwymiarowej struktury ogniskowanej strugi.

Celem pracy było określenie wpływu prędkości przepływu oraz lepkości i napięcia powierzchniowego cieczy na kształt i położenie ogniskowanej strugi cieczy w przekroju mikrokanala.

Aparatura i media doświadczalne

Obserwacja zjawiska hydrodynamicznego ogniskowania była prowadzona metodą mikroanemometrii obrazowej opartej o mikroskop *Olympus BX 51* wyposażony w obiektywy $10\times/0,25$ i $20\times/0,4$. W celu analizy trójwymiarowej struktury przepływu użyto mikroskopu konfokalnego *Carl Zeiss CSM 510* wyposażonego w 8-bitowy przetwornik CCD i obiektyw *Plan-Neofluar 20\times/0,5*. Zależnie od badanego medium posłużono się laserem helowo-neonowym bądź argonowym produkcji *Lasos Lasertechnik*. Badania prowadzono w kanałach prostokątnych o rozmiarach $1020\times 800\ \mu\text{m}$, $400\times 300\ \mu\text{m}$ oraz $260\times 200\ \mu\text{m}$. Szczegóły budowy aparatury pomiarowej przedstawiono w pracy [5, 6].

Jako media doświadczalne stosowano wodę demineralizowaną, wodne roztwory glukozy o różnych lepkościach $1,25\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ (glukoza I) i $12,5\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ (glukoza II) oraz wodę z dodatkiem środka powierzch-



Rys. 1. Schemat hydrodynamicznego ogniskowania cieczy w węźle mikrokanalów Q_A i Q_B – strumienie boczne, Q_C – strumień ogniskowany, δ_s – grubość ogniskowanej strugi

niowo czynnego *Tryton X-100* obniżającego napięcie powierzchniowe demineralizowanej wody z 73 do $31\ \text{mN/m}^2$.

Omówienie wyników

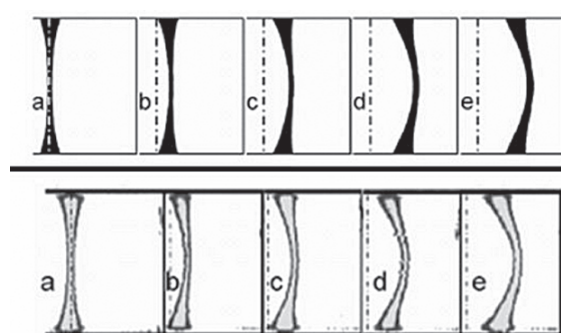
Analiza wykonanego szerokiego zakresu badań struktur ogniskowanej strugi wskazuje, że dla identycznych strumieni bocznych $Q_A = Q_B$, struga opuszcza układ płynąc w osi kanału. Dla małych prędkości przepływu cieczy ogniskowana struga ma przekrój podwójnie wypukły, zaś dla dużych prędkości przekrój strugi ma kształt dwuwypukły. W przypadku gdy ogniskujące strumienie nie są symetryczne ogniskowana struga jest odsunięta od osi kanału. Występują więc dwa aspekty deformacji strugi: pierwszy polegający na nierównomiernym rozkładzie grubości i drugi polegający na zakrzywieniu ogniskowanej strugi odsuniętej od osi kanału niesymetrycznymi strumieniami bocznymi (Rys. 2).

Na rys. 3 przedstawiono podstawowe parametry geometryczne definiujące kształt ogniskowanej strugi: z – odsunięcie środka strugi od osi kanału; R – promień krzywizny; c – wielkość krzyżownicy przyściennej.

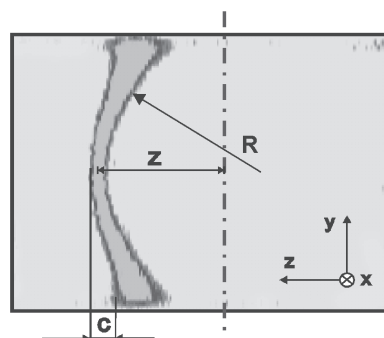
W korelowaniu danych doświadczalnych posłużono się bezwymiarowymi wartościami prezentowanymi na rys. 3 wielkości i oznaczono je z' , c' , R' . Są one stosunkami odpowiedniej wielkości z , c , R (Rys. 3) do średnicy zastępczej kanału.

Na rys. 4 przedstawiono zależność bezwymiarowego odsunięcia strugi od osi kanału z' w funkcji stosunku Q_A/Q_B .

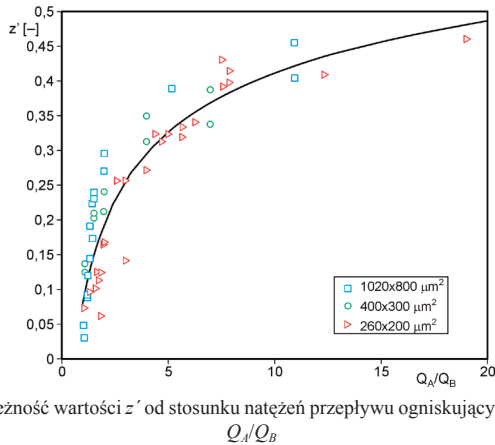
Jak łatwo stwierdzić wartość bezwymiarowego odsunięcia ogniskowanej strugi z' jest niezależna od wielkości kanału, jak również od wartości liczby *Reynoldsa*.



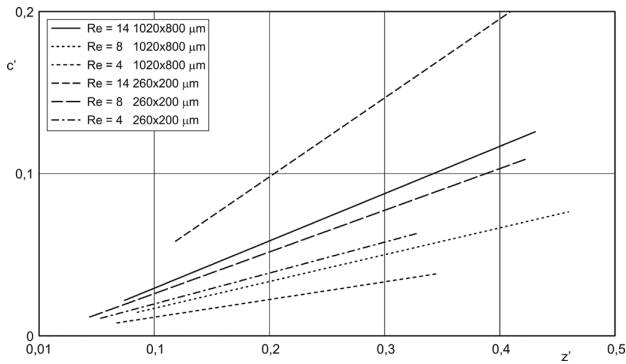
Rys. 2. Kształt ogniskowanej strugi dla różnych stosunków natężeń strumieni bocznych Q_A/Q_B : a) 1; b) 1,73; c) 2,0; d) 3,0; e) 7,56. Kanał $1020\times 800\ \mu\text{m}$; $v = 1,35\ \text{mm/s}$. Rysunek górny (symulacja), rysunek dolny (dane doświadczalne)



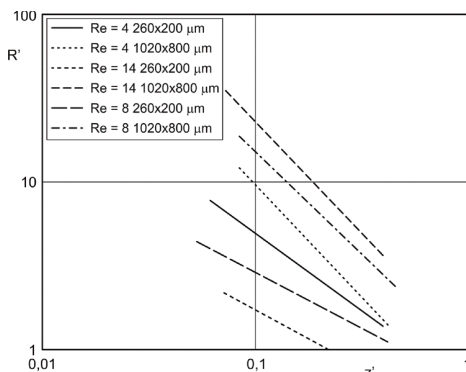
Rys. 3. Ilustracja parametrów opisujących kształt ogniskowanej strugi cieczy



Rys. 4. Zależność wartości z' od stosunku natężeń przepływu ogniskujących strumieni Q_A/Q_B



Rys. 5. Zależność wartości c' od bezwymiarowej wartości z'



Rys. 6. Zależność wartości R' od bezwymiarowej wartości z'

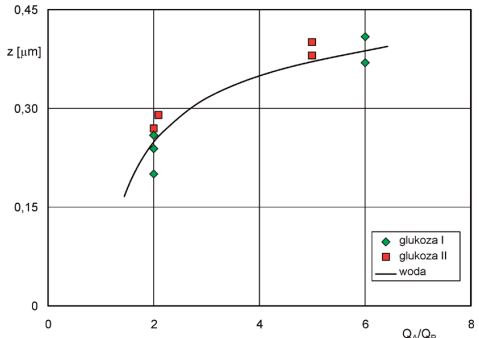
Na wykresach rys. 5 i 6 przedstawiono zbiorcze zestawienie uzyskanych doświadczalnie zależności $c' = f(z')$ oraz $R' = f(z')$.

Ze wzrostem prędkości przepływu cieczy (a więc i wartości liczby *Reynoldsa*) odkształcenie przyścienne strugi wzrasta. Z rys. 5 wynika również, że bezwymiarowa krzywizna przyścienna c' silnie zależy od rozmiaru kanału.

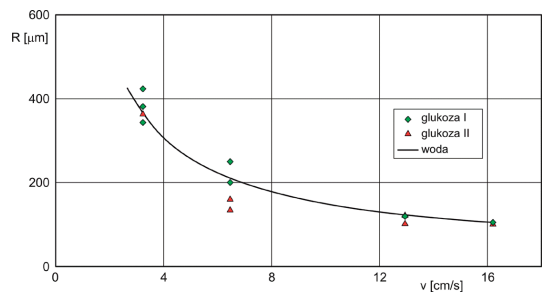
Bezwymiarowy promień krzywizny ogniskowanej strugi R' rośnie ze wzrostem prędkości przepływu cieczy w kanale (a więc i wartości liczby *Reynoldsa*) i jest większy dla kanału o większym rozmiarze.

Na przykładowych rys. 7–10 pokazano wpływ lepkości i napięcia powierzchniowego cieczy na parametry charakteryzujące kształt przekroju ogniskowanej strugi. Na rysunkach tych naniesiono krzywą, która opisuje dane uzyskane w przypadku ogniskowania strugi wody demineralizowanej ($\mu = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; $\sigma = 73 \text{ mN/m}^2$).

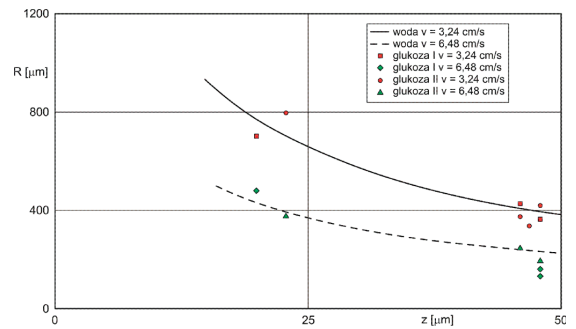
Z analizy danych doświadczalnych przedstawionych na rys. 7–10 łatwo stwierdzić, że w zakresie przeprowadzonych pomiarów wpływ zmian lepkości i napięcia powierzchniowego cieczy na kształt ogniskowanej strugi cieczy był zaniedbywalny. Nie ulega wątpliwości, że zagadnienie wpływu lepkości i napięcia powierzchniowego cieczy poddawanej procesowi hydrodynamicznego ogniskowania w mikrokanale wymaga dalszych intensywnych badań.



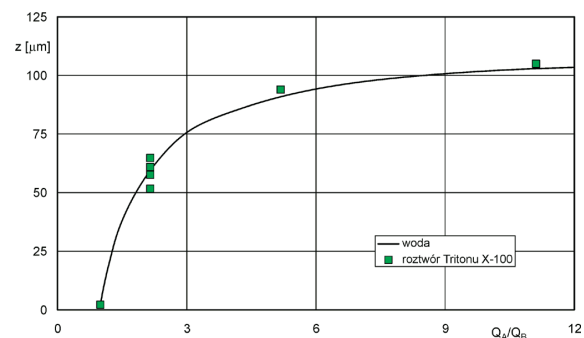
Rys. 7. Zależność odsunięcia ogniskowanej strugi od osi kanału od natężeń strumieni bocznych dla cieczy o różnych lepkościach



Rys. 8. Zależność promienia krzywizny ogniskowanej strugi od odsunięcia od osi kanału dla różnych prędkości przepływu i lepkości ogniskowanej cieczy



Rys. 9. Zależność promienia krzywizny ogniskowanej strugi od odsunięcia od osi kanału dla cieczy o różnych wartościach napięcia powierzchniowego



Rys. 10. Zależność odsunięcia ogniskowanej strugi od osi kanału od natężeń strumieni bocznych dla cieczy o różnych wartościach napięcia powierzchniowego

LITERATURA

[1] M. Dziubiński, P. Domagalski: Chem. Proc. Eng. **28**, 567 (2007).
 [2] M. Joanicot, A. Ajdari: Science **309** (5736), 887 (2005).
 [3] M.M. Mielnik, L.R. Saetran: Exp. Fluids **41**, 155 (2006).
 [4] Y. Wu, N-T Nguen: Sensors and Actuators B **107**(2), 965 (2005).
 [5] P.M. Domagalski, M.M. Mielnik, I. Lunde, L.R. Saetran: Int. J. Heat Transfer Engineering **28**(8), 680 (2008).
 [6] P. Domagalski, M. Dziubiński, M.M. Mielnik, L.R. Saetran: Inż. Ap.Chem. **45**, nr 6, 53 (2006).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy nr N N208 2943 33.