

PIOTR DOMAGALSKI  
MAREK DZIUBIŃSKI

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

# Modelowanie numeryczne ogniskowania strugi cieczy w węźle mikrokanalów

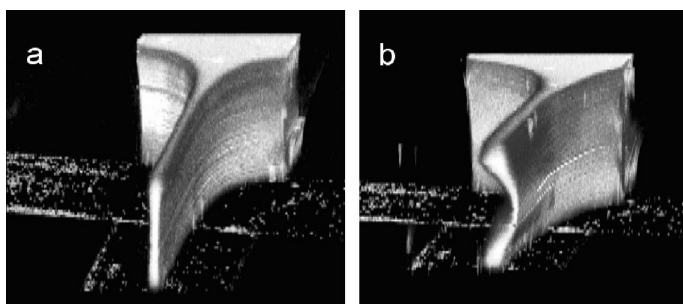
## Wprowadzenie

Jednym z najnowszych trendów badawczych hydrodynamiki przepływu w mikrokanalach jest zagadnienie ogniskowania hydrodynamicznego strugi cieczy. Ogniskowanie hydrodynamiczne jest techniką polegającą na zwężeniu jednego ze strumieni cieczy w węźle mikrokanalów, przekształcając go za pomocą strumieni bocznych w strumień o żądanej konfiguracji geometrycznej. Zjawisko to stwarza szeroki wachlarz praktycznych możliwości jego zastosowań. Obejmują one technologię dozowania substratów do mikroreaktorów, sterowanie przepływami w aplikacjach *Lab-on-a-Chip*, wytwarzanie układów dwufazowych (szczególnie emulsji) oraz analizę medyczną (cytometria).

W ostatnim czasie zaproponowano zastosowanie metody hydrodynamicznego ogniskowania w wizualizacji przepływów w skali mikro [1–3], jako modyfikację techniki *mikro-PIV* (*Micro Particle Imaging Velocimetry*). W celu rozwiązania niedogodności związanych z ograniczeniami systemu optycznego zaproponowano wprowadzenie znaczników do przepływu w postaci cienkiej laminarnej warstwy uzyskanej za pomocą hydrodynamicznego ogniskowania.

Takie rozwiązanie wymaga jednak w celu wizualizacji przepływu w całym przekroju poprzecznym kanału możliwości zmiany pozycji wprowadzanej warstwy. Jest to możliwe dzięki ogniskowaniu prowadzonemu za pomocą dwóch niejednakowych strumieni bocznych. Regulując stosunek natężeń dopływów bocznych steruje się pozycją ogniskowanej strugi.

Najnowsze badania uwidoczniają nieopisaną do tej pory w literaturze przedmiotu złożoność hydrodynamiki ogniskowania strugi cieczy w mikrokanalach. Dokładna analiza struktury przepływu wskazuje na deformacje ogniskowanej strugi zależne od parametrów procesu ogniskowania [3]. Odsunięta od centrum kanału struga ulega w przekroju prostopadłym do kierunku przepływu zakrzywieniu, które wzrasta wraz z odległością od osi kanału (Rys. 1).



Rys. 1. Deformacja ogniskowanej strugi dla a) symetrycznych i b) niesymetrycznych strumieni bocznych

Wzrastające wymagania dotyczące techniki hydroogniskowania strugi cieczy w mikroprzepływach oraz szerokie możliwości praktycznego zastosowania tej techniki wskazują na konieczność dokładnego zbadania tego zjawiska.

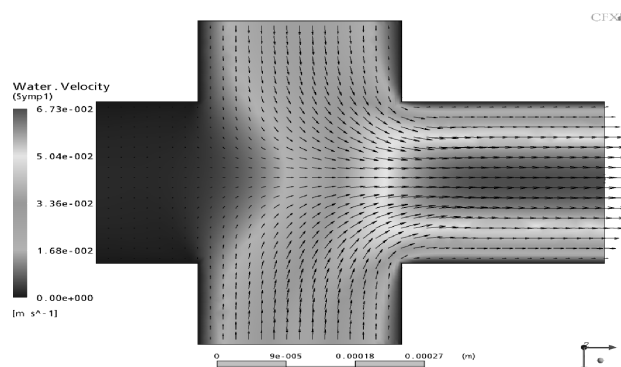
W pracy przedstawiono wyniki modelowania numerycznego CFD parametrów procesu hydroogniskowania strugi cieczy w węźle mikrokanalów. Modelowanymi wielkościami były profile prędkości, kształt, położenie i geometria ogniskowanej strugi oraz jej odkształcenie i krzywizna w funkcji odsunięcia od osi kanału.

## Omówienie wyników symulacji numerycznych

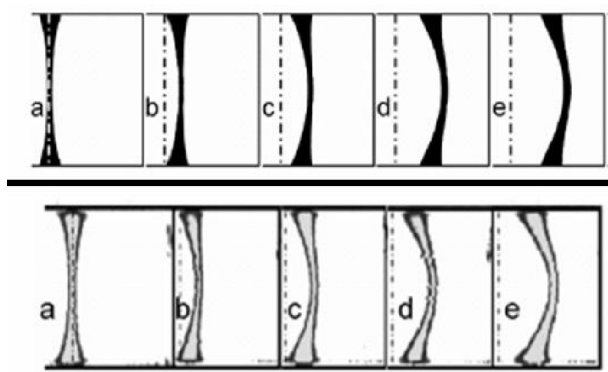
Symulacje CFD procesu ogniskowania strugi cieczy w węźle mikrokanalów przeprowadzono za pomocą dostępnych komercyjnie pakietów *ANSYS CFX 10* i *ANSYS FLUENT 6.2* stosując komputer *Pentium 4 PC* (3,6 MHz CDU, 2 GB RAM, *Windows XP*). Przepływ był modelowany za pomocą równań *Naviera-Stokesa* dla płynu newtonowskiego nieściśliwego oraz równania ciągłości przepływu.

Przekroje poprzeczne symulowanych układów kanałów wynosiły 100×100, 200×260 i 1020×800 μm. Specyfika geometrii pozwoliła na zmniejszenie rozmiarów domeny obliczeniowej o połowę dzięki symetryczności modelowanego zjawiska. W rezultacie domenę obliczeniową stanowiła niestrukturalna siatka zbudowana – zależnie od symulowanego przypadku przepływu – z 1499 do 2624 tys. elementów (265–460 tys. węzłów). Dalsze zagęszczanie siatki nie poprawiało wyników obliczeń.

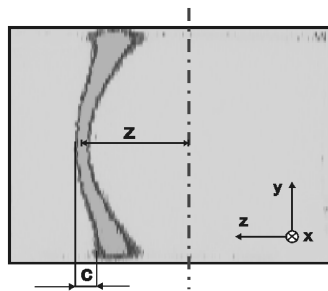
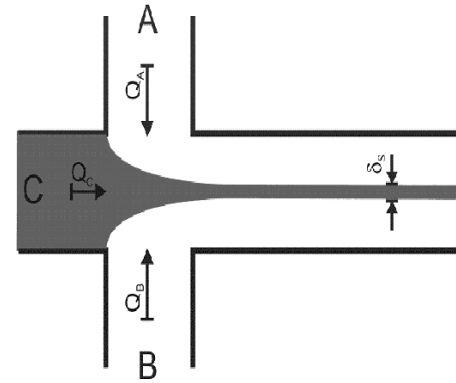
Na rys. 2 przedstawiono przykładową symulację rozkładu prędkości w węźle mikrokanalów dla tych samych natężeń przepływu strumieni bocznych. Różnice między zmierzonymi i obliczonymi na drodze symulacji prędkości przepływu nie przekraczały w skrajnym przypadku 2%, co potwierdza poprawność przeprowadzonych obliczeń modelowych.



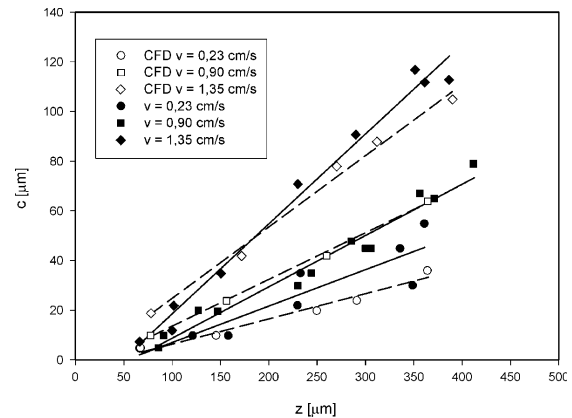
Rys. 2. Wyniki symulacji rozkładu prędkości w węźle mikrokanalów o rozmiarach 260×200 μm i tych samych natężeniach przepływu strumieni bocznych



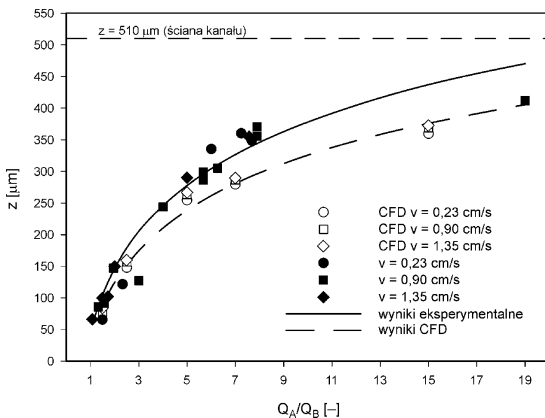
Rys. 3. Wyniki symulacji (górny rysunek) oraz wyniki eksperymentalne (dolny rysunek) kształtów zdeformowanej strugi dla różnych stosunków natężeń strumieni bocznych  $Q_A/Q_B$  wynoszących a) 1; b) 1,73; c) 2; d) 3; e) 7,56



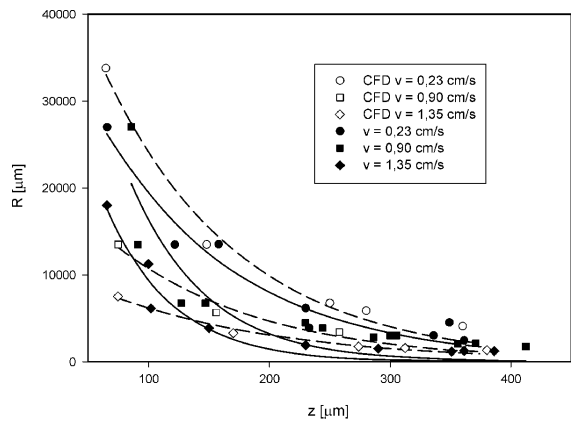
Rys. 4. Przekrój kanału odpływowego wraz z mierzonymi i symulowanymi wielkościami określającymi kształt ogniskowanej strugi cieczy



Rys. 6. Odkształcenie ogniskowanej strugi w funkcji odsunięcia od osi kanału o wymiarach 1020×800 μm



Rys. 5. Odsunięcie ogniskowanej strugi od osi kanału w funkcji stosunku strumieni ogniskujących (kanał 1020×800 μm)



Rys. 7. Zależność promienia krzywizny ogniskowanej strugi od przesunięcia z dla kanału o wymiarach 1020×800 μm

Na rys. 3 przedstawiono porównanie wyników pomiarów eksperymentalnych za pomocą mikroskopii konfokalnej z wynikami symulacji CFD kształtu ogniskowanej strugi cieczy. Uzyskane modelowe kształty zdeformowanej strugi bardzo dobrze odzwierciedlają dane doświadczalne.

Jako podstawowe parametry geometryczne definiujące kształt i zachowanie się ogniskowanej strugi wybrano odsunięcie środka strugi od osi kanału  $z$ , jej krzywiznę reprezentowaną przez promień  $R$  i odległość  $c$  będącą różnicą przesunięcia części centralnej strugi i jej krawędzi. Wielkości te ilustruje rys. 4

Na przykładowych rys. 5–7 porównano uzyskane eksperymentalnie (mikroskopia konfokalna) i na drodze symulacji numerycznych wielkości charakteryzujące kształt ogniskowanej strugi cieczy.

Jak wynika z przykładowych rys. 5–7 oraz pozostałych wyników symulacji numerycznych dostępne dane doświadczalne z bardzo dobrą dokładnością potwierdzają uzyskane wyniki symulacji procesu hydroogniskowania strugi cieczy w węzle mikrokanalów.

## LITERATURA

1. M.M.Mielnik, L.R.Saetran: Experiments in Fluids 41, 155 (2006).
2. M.Dziubiński, P.P.Domagalski: Chem. Proc. Eng., 28, 567 (2007).
3. P.P.Domagalski, M.M.Mielnik, L.R.Saetran: Int. J. Heat Trans.Eng., 28, 680 (2007).

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