



Hydrodynamika mikroprzepływów – podejście klasyczne

Przepływy w mikrokanalach aparatów LOC mogą mieć charakter samoistny, na skutek działania siły ciężkości, napięcia powierzchniowego oraz sił elektroforetycznych, lub wymuszony na skutek przyłożonego nadciśnienia (*Chen JJ i inni, 2009*). Przy dziesięciokrotnym zmniejszeniu wymiaru liniowego, stosunek powierzchnia/objętość rośnie dziesięciokrotnie, co ma zasadnicze znaczenie dla właściwości w/w układów. Oddziaływania powierzchniowe oraz struktura powierzchni kanału wywierają znaczący wpływ na przepływy płynów w mikrokanalach (*Hessel V i inni, 2009*). Badania mikroprzepływów mogą być prowadzone metodami analitycznymi, numerycznymi i eksperymentalnymi. Jedną z najbardziej uznanych metod obrazowania przepływu jest anemometria obrazowa „Particle Image Velocimetry” (PIV). Metoda ta wykorzystuje cyfrową analizę obrazu oraz metodę korelacji krzyżowej do wyznaczenia wektorów przesunięć cząstek znacznikowych zawieszonych w płynie. W metodzie tej wykorzystywane jest zazwyczaj impulsowe źródło promieniowania laserowego, którego wiązka dzięki zastosowaniu optyki liniowej tworzy płaszczyznę świetlną. Promieniowanie świetlne rozpraszane jest na cząstkach traseira, dzięki czemu ich położenie może być rejestrowane za pomocą matryc CCD lub CMOS w postaci cyfrowych obrazów. W ten sposób powstałe w kolejnych chwilach czasu obrazy są dzielone na domeny (podobszary), w których analizowane są przesunięcia cząstek znacznikowych. Zaletą metod z tej grupy, w odróżnieniu od metod pomiaru punkowego CTA czy LDA, jest możliwość obrazowania struktury przepływu, jego wirowości oraz nieustalonego i zmiennego w czasie charakteru. Implementacją w/w metody dla mikroprzepływów jest μ PIV (*Lindken R i inni, 2009*).

Izotermiczny, laminarny przepływ cieczy w prostoliniowym mikrokanale o gładkich ścianach i średnicy w zakresie 10 do 200 μm , z racji średnicy o kilka rzędów większej od średniej drogi swobodnej cząsteczek $\text{Kn} < 0.001$, spełnia założenie o ciągłości strugi i opisany może zostać za pomocą równania Hagena-Poiseuille'a (1), gdzie μ – wsp. lepkości dynamicznej, Pa s; L – długość kanału, m; V – strumień objętości płynu, m^3/s , d – średnica kanału, m.

$$\Delta P = \frac{8\mu L \dot{V}}{\pi d^4} \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{r} \quad (2)$$

Ciśnienie kapilarne opisane jest równaniem (2), gdzie γ – napięcie powierzchniowe, N/m; θ – kąt zwilżania powierzchni; r – promień kanału, m. Dla tego typu przepływu, przy założeniu braku poślizgu płynu na powierzchni ściany, otrzymujemy paraboliczny profil prędkości płynu w kanale.

Rzeczywiste mikrochipy złożone są z sieci wzajemnie połączonych mikrokanalów i komór, często o skomplikowanej geometrii, w których światło nierzadko rozmieszczone są dodatkowe elementy – promotory burzliwości. Pełny opis hydrodynamiki izotermicznych przepływów nieściśliwych płynów newtonowskich w rzeczywistych układach LOC możliwy jest za pomocą równania Naviera-Stokesa i ciągłości – równania (3-4), gdzie ρ – lokalna gęstość płynu kg/m^3 , u – lokalna prędkość płynu (wektor), m/s; μ – wsp. lepkości dynamicznej, Pa s; P – ciśnienie, Pa; I – tensor jednostkowy; g – przyspieszenie ziemskie m/s^2 (*Jaworski Z, 2005*).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) - \nabla \cdot (P \vec{I}) + \rho \vec{g} \quad (4)$$

Rozwiązanie powyższych równań uzupełnionych o warunki jednoznaczności rozwiązania dla mikroaparatu uzyskuje się metodami numerycznymi „Computational Fluid Dynamics” (CFD) (*Malecha K i inni, 2009b; Deshmukh SR, Vlachos DG, 2005*). W przypadku przepływów wielofazowych stosuje się podejście Eulerowsko-Eulerowskie „uciągając” właściwości fazy zdyspergowanej (*Szafran R,*



Modelski S, 2007), bądź w podejściu Eulerowsko-Lagrangeowskim fazę zdyspergowaną traktuje się jak zbiór dyskretnych cząstek. Drugi sposób opisu, choć z fizycznego punktu widzenia właściwszy, z uwagi na wysokie zapotrzebowanie na moc obliczeniową, ma zastosowanie do układów rzadkich, w których zaniedbuje się oddziaływania cząstka-cząstka oraz wpływ koncentracji cząstek na hydrodynamikę przepływu fazy zwartej (ANSYS/Fluent).