

Modelowanie i analiza przepływu krwi w ujęciu wielofazowym

Choroby układu krążenia zgodnie ze statystykami światowej organizacji zdrowia są główną przyczyną przedwczesnych zgonów na świecie. Dlatego zrozumienie podstawowych mechanizmów i zjawisk występujących w układzie sercowo-naczyniowym może być przydatne do wczesnego wykrycia i diagnozy rozwijających się zmian chorobowych w naczyniach krwionośnych. Często w przypadku zmian wykrytych we wczesnym stadium ich rozwoju można zastosować leczenie farmakologiczne zamiast skomplikowanych i drogich procedur chirurgicznych. W ostatnich latach numeryczne modelowanie mechaniki płynów znalazło szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach inżynierii i również z powodzeniem może być wykorzystywane do symulacji przepływów w organizmach żywych. Modele komputerowe mogą być posłużone do przeprowadzania wirtualnych eksperymentów, które dadzą odpowiedzi w zakresie opisu zjawiska oraz warunków przepływów w ludzkim ciele. Modelowanie numeryczne wykorzystywane jest również przy konstrukcji urządzeń medycznych, takich jak sztuczne serca oraz implanty zastawek. Uzyskany podczas symulacji przepływu dokładny obraz pola prędkości oraz ciśnienia może pomóc na przykład we wskazaniu obszarów narażonych na zmiany patologiczne (odkładanie się płytki miażdżycowej) i choroby układu krwionośnego.

Celem pracy było sprawdzenie wykonalności oraz wskazanie użyteczności modelowania wielofazowego w przepływie krwi. Zaproponowane modele zwalidowano wykorzystując dane dostępne w literaturze oraz pochodzące z eksperymentów.

Model wielofazowy. Celem przeprowadzonych badań było zbadanie możliwości wykorzystania numerycznej mechaniki płynów do symulacji wielofazowego przepływu krwi w naczyniach krwionośnych i mikrokanałach. Przeprowadzona została analiza numeryczna przepływu krwi w aorcie, prawej tętnicy wieńcowej oraz mikrokanałach z różnej wielkości hiperbolicznym przewężeniem. Krew traktowana była jako mieszanina niehomogeniczna składająca się z trzech głównych składników. Modelowanie przepływu krwi jako ośrodka wielofazowego pozwala na rozróżnienie w modelu głównych składników krwi: erytrocytów, leukocytów oraz osocza.

Przepływ krwi w aorcie. W symulacji przepływu krwi w aorcie wykorzystany został trójfazowy model Euler-Euler. W tym podejściu każda z modelowanych faz traktowana jest jako kontinuum przenikające się wzajemnie z innymi składnikami. By odwzorować pulsacyjny charakter przepływu krwi zaimplementowany został pulsacyjny warunek przegowy na wlocie do tętnicy. Model Windkessel został wykorzystany by uwzględnić wpływ całego układu krwionośnego na wybrany odcinek naczynia.

Przepływ krwi w tętnicy wieńcowej. Model numeryczny przepływu krwi w tętnicy wieńcowej został zbudowany z wykorzystaniem dwufazowego podejścia Euler-Euler w celu dokładnego odwzorowania interakcji pomiędzy osoczem i czerwonymi krwinkami. Interakcja pomiędzy dwoma głównymi komponentami jest szczególnie istotna w naczyniach o mniejszych średnicach gdzie wyraźnie widoczna zaczyna być tendencja erytrocytów do migracji w kierunku rdzenia naczynia, tak zwany efekt Fåhræus-Lindqvist. Wpływ na taki charakter przepływu ma wartość temperatury granularnej, która

reprezentuje energię chaotycznego ruchu cząsteczek. Wykorzystując tzw. procedury własne zmodyfikowane zostało wbudowane równanie temperatury granularnej.

Przepływ krwi w mikrokanale. Model numeryczny przepływu krwi w skali mikro objął symulację przepływu dekstranu, który jest substytutem osocza oraz erytrocytów. Zbadany został wpływ hiperbolicznego zwężenia mikrokanału na proces formowania się warstwy wolnej od czerwonych krwinek. W modelu wykorzystano podejście Euler-Euler oraz hybrydowe Euler-Lagrange modelowania wielofazowego. Wyniki symulacji poddano walidacji wykorzystując wyniki eksperymentu *in vitro*. Symulacje przeprowadzono przy użyciu komercyjnego oprogramowania ANSYS Fluent (ANSYS Inc., USA).

Budowa modelu numerycznego. Analiza przedstawionych symulacji została wykorzystana do przygotowania przewodnika do budowy modeli numerycznych przepływu krwi w naczyniach o różnej skali średnic. Podsumowane zostały parametry i ustawienia solwera pozwalające odwzorować rzeczywisty charakter przepływu krwi. Zarówno zalecenia zebrane w przewodniku jak i kody źródłowe funkcji użytkownika (UDF) zostały przedstawione w celu ułatwienia badaczom prowadzenia kolejnych prac.

Słowa kluczowe: biomechanika płynów, hemodynamika, CFD, przepływ krwi, erytrocyty, aorta, tętnica wieńcowa, mikrokanal, model Euler-Euler, model Euler-Lagrange
