

Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.  
Katedra mechaniky, NTIS  
Fakulta aplikovaných věd  
Západočeská univerzita v Plzni  
Technická 8  
306 14 Plzeň

## OPONENTSKÝ POSUDEK

Diplomové práce **Bc. Barbory Marešové**  
nazvané

### **3D-0D modelování proudění krve v rekonstruovaných modelech aneurysmat břišní aorty**

Diplomová práce Bc. B. Marešové se zabývá aktuálním problémem numerické simulace proudění krve v modelech aneurysmat břišní aorty (AAA). Aplikované modely vycházejí z reálných geometrií AAA určených na základě CT dat konkrétních pacientů.

Cílem diplomové práce je provést analýzu vlivu fyziologických okrajových podmínek a neneutonských vlastností krve na rozložení tlakového a proudového pole v AAA a jejich vlivu na hemodynamiku cévního systému. Jako výstupní tlaková okrajová podmínka byl použit tzv. 0D Windkessel model.

Diplomová práce o 82 stránkách je rozdělena do sedmi kapitol doplněných použitou literaturou a přílohou se zdrojovými kódy MATLABu. V úvodu autorka stručně charakterizuje AAA, uvádí čtenáře do problematiky a zkráceně charakterizuje obsahy jednotlivých kapitol své diplomové práce. Kapitola 2 rozšiřuje charakteristiku a léčbu AAA a je úvodem do modelování proudění krve. Jsou zde stručně popsány základní charakteristiky a složení krve z pohledu tokových vlastností. Dále jsou zde uvedeny základní viskozimetry a nejčastěji používané modely krve jakožto neneutonské kapaliny. Kapitola 3 definuje tlakovou pulsni vlnou v aortě a zavádí Windkessel modely (dvouprvkový, tříprvkový a čtyřprvkový model) pro popis křivek krevního tlaku. Jedná se o typické analogové modelování problémů biomechaniky. Je zde rovněž uvedena rešerše zaměřená na víceškálové proudění krve a na možné způsoby určení příslušných parametrů Windkessel modelů. Kapitola 4 se zabývá konkrétní identifikací parametrů Windkessel modelu. Přes rovnici kontinuity a Bernoulliovu rovnici reálné kapaliny se diplomantka potom dostává na ztrátu mechanické energie při proudění reálných kapalin. V další části této kapitoly je definován idealizovaný 3D model AAA, na kterém je zkoumán vliv kvality výpočetní sítě na výsledky simulace proudění v AAA a je provedeno srovnání 3D a 1D modelu. V závěru kapitoly je potom provedena identifikace parametrů Windkessel modelu a je provedeno porovnání dvou variant výstupní okrajové podmínky. Pátá kapitola má sice název numerická simulace 3D proudění krve, ale zabývá se prakticky tvorbou výpočetní sítě 3D modelů a identifikací parametrů 0D modelů reálných AAA. Vlastnímu výpočtu je věnován jeden menší odstavec. Výsledky numerických simulací laminárního proudění krve v modelech AAA jsou potom graficky znázorněny v kapitole 6. Nejdříve jsou analyzovány vlastnosti tlakového a rychlostního pole v modelech AAA během srdeční periody. V závěru kapitoly je potom konstatováno, že numerické simulace neprokázaly podstatný vliv neneutonského modelu krve na charakter proudění.

Kapitola 7 potom shrnuje celou diplomovou práci a ukazuje další možnosti pro rozvoj použitých modelů proudění krve v AAA. Na závěr diplomové práce je uvedena použitá literatura a příloha s programovými moduly.

Diplomová práce je napsána poměrně pečlivě, věcně a celkem je srozumitelná. Má dobrou odbornou úroveň a výbornou grafickou úpravu prakticky bez přepisů. Některé pasáže práce by se daly vypustit, resp. zestručnit, jako např. Kirchhoffovy zákony a přehled viskozimetrů. U viskozimetrů nejsou dále uvedeny žádné předpoklady pro měření zdánlivé viskozity neneutonských kapalin, resp. krve (mlčky se předpokládá, že bude měřena krev). Dále se v textu čtenář např. nedozví, jaké rovnice byly použity pro řešení nestacionárního proudění krve, jaký je význam jednotlivých parametrů u modelů neneutonských kapalin. Některé obrázky by bylo vhodné lépe popsat (např. význam parametru N na obr. 12, popis svíslé osy v obr. 27, označení míst A – F v obr. 18, v kapitole 5 je chybné značení obr. atd.). Někde v práci by bylo vhodné uvést, že se jedná o izotermické proudění krve. Některé věty by bylo vhodné přesněji formulovat (např. str. 24 – setrvačnost krve; str. 64 - víveškalové modelování; str. 42 – okrajové podmínky předepsány pomocí UDF atd.).

#### **Otázky jako úvod do diskuse při vlastní obhajobě diplomové práce**

- 1) Vysvětlit význam označení 3D-0D modely proudění krve?
- 2) Jaké podmínky musí splňovat viskozimetry, pokud je chceme použít pro měření tokových vlastností krve (neneutonské kapaliny)?
- 3) Vysvětlit větu: „Okrajové podmínky byly předepsány pomocí UDF“ (str. 42). Dále jaké a jak byly předepsány?
- 4) Vysvětlit větu: „Parametry 0D modelu byly v tomto případě analyzovány pomocí blokového schématu v prostředí S“ (str. 30).
- 5) Jak byl reálně proveden výpočet proudění v AAA s připojeným 0D modelem na výstupu (obr. 31, str. 41, uvedený model neodpovídá dříve uvedeným Windkessel modelům). Ocením uvedení hrubého vývojového diagramu včetně izomorfního zobrazení.
- 6) Odpovídá závěr o vlivu neneutonského chování krve na charakter proudění skutečnosti?

#### **Závěr**

*Diplomová práce splnila formulované a stanovené cíle. Práce má velmi dobrou úroveň konkrétními praktickými přínosy. Je napsána poměrně pečlivě s výbornou úrovní grafické úpravy.*

*Diplomovou práci hodnotím známkou „velmi dobře“ a doporučuji ji k obhajobě před komisí SZZ na KME.*

V Plzni dne 16. června 2015

  
Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.