

Oponentský posudek disertační práce

Ing. Dominika Šedivého
s názvem

„Interakce nenewtonské kapaliny s pružnou stěnou“

Doktorand: Ing. Dominik Šedivý, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav
Školitel: doc. Ing. Simona Fialová, Ph.D., VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav
Oponent: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D., VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Posudek byl zpracován na základě dopisu doc. Ing. Jiřího pospíšila, Ph.D., předsedy komise pro obhajobu disertační práce ze dne 5. 12. 2022.

Tématem předložené disertační práce je analýza interakce nenewtonské kapaliny s pružnou stěnou trubice s cílem aplikovat získané poznatky na proudění krve v aortě.

Aktuálnost tématu disertační práce

Zvolené téma patří k aktuálním vzhledem k tomu, že postižení kardiovaskulárního systému je významným medicínským a také společenským problémem, kterému je věnována velká pozornost odborné i laické veřejnosti. Z hlediska dynamiky tekutin je proudění krve je složitou úlohou, ovlivněnou fyzikálními vlastnostmi krve, složitostí krevního oběhu, periodickými změnami tlaku a interakcí poddajné stěny s proudící krví. Experimentální a matematické modelování kardiovaskulárního systému, podpořené rychlým rozvojem výpočetní a experimentální techniky, napomáhá pochopení vztahů mezi jednotlivými hemodynamickými parametry a jejich vzájemnému působení.

Splnění stanoveného cíle

Cíle práce pro část experimentální i pro numerické simulace jsou uvedeny v kapitole 3 v návaznosti na předchozí řešební část práce. Hlavním cílem je stanovení silového působení proudící nenewtonské kapaliny na pružnou stěnu potrubí a vyšetření rychlostních profilů a radiálních posuvů v oblastech deformovaného potrubí experimentální i výpočetní metodou. Na základě získaných výsledků a rozboru významnosti jednotlivých parametrů pro řešení této komplexní úlohy experimentálního a numerického modelování části kardiovaskulárního systému lze konstatovat, že deklarované cíle byly naplněny.

Postup řešení, výsledky disertační práce a konkrétní přínos doktoranda

Ke zkoumání zvoleného problému doktorand využil jak experimentální měření, tak i počítačové simulace. Experimentální část navázala na výsledky práce, která byla provedena v laboratoři Technické univerzity Liberec. Původní uzavřený měřicí okruh byl pro tento účel modifikován a byl sestaven jako otevřená trať. Měření byla provedena s newtonskou i nenewtonskou kapalinou, a to pro tuhé (skleněné) a poddajné (silikonové) potrubí. Nenewtonská kapalina byla vytvořena jako směs vody, glycerolu a xantanové gumy, materiálové vlastnosti pružného potrubí byly stanoveny pomocí tahové zkoušky. Viskozita kapalin použitých

při měření byla změřena pomocí rotačního viskozimetru. Hlavním výstupem měření byly rychlostní profily vyhodnocené technikou PIV v polovině délky trubice, velikosti deformací poddajné trubice a tlakové průběhy na okrajích zkoumané oblasti.

Matematické simulace byly realizovány v prostředí ANSYS. CFD výpočty v tuhém potrubí byly provedeny v programu ANSYS Fluent. Pro FSI simulace bylo využito provázání Fluentu s ANSYS Transient Structural pomocí programu System Coupling. Všechny numerické výpočty byly řešeny jako nestacionární za předpokladu laminárního proudění. Snahou bylo využít data z experimentu pro definici okrajových podmínek a pomocí simulací určit veličiny, které bylo obtížné získat experimentálně. Je zřejmé, že za získanými výstupy je spousta práce, ale v některých případech by si zasloužily hlubší analýzu a komentář.

V závěru práce je uvedena možnost aproximace pulzní tlakové křivky v aortě pomocí 1D modelu. Je zde zmíněn tzv. Windkessel efekt a uveden tříprvkový Windkessel model, popisující tlakovou křivku s ohledem na roztažnost cév a odpor periferního řečiště. Tento model vychází z analogie proudění kapalin a elektrického proudu a může být popsán pomocí elektrického obvodu s vhodně zapojenými prvky (odpory, kondenzátory). I přes svou jednoduchost a minimální výpočtové nároky poměrně přesně vystihuje děje měřené na reálných pacientech či zvířatech. V kombinaci s 3D modely může být využit jako nástroj pro dosažení fyziologicky korektních okrajových podmínek.

Z dosažených výsledků numerických simulací vyplývá výrazná závislost na přesné definici mechanických vlastností cév a na zadaných okrajových podmínkách, zejména pokud bude cílem dosáhnout fyziologicky odpovídající výsledky. Nenewtonské efekty se v daných definovaných podmínkách experimentu významně neprojevily, a to zřejmě v důsledku poměrně vysokých smykových rychlostí. Lze konstatovat, že disertační práce přináší konkrétní původní poznatky a postupy pro realizaci experimentálních a numerických simulací proudění krve v pružných cévách a přispívá k pochopení možností i úskalí řešení úloh tohoto typu.

Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru

Současným trendem je studium deformačně napětových analýz aneurysmat (výdutí) tepen. Cílem je porozumět příčinám jejich vzniku, predikovat další vývoj, možnost ruptury a nutnost chirurgického zákroku. Detailnější porozumění FSI v této oblasti přináší nové využitelné poznatky pro přípravu komplexních matematických modelů založených na přesné 3D reprezentaci geometrie a mechanických vlastností CVS. Ty jsou, jak vyplývá i z výsledků práce, pro modelování proudění v pružných cévách podstatné.

Výsledky a postupy aplikované v disertační práci jsou využitelné v praxi i pro jiné případy interakce proudící kapaliny s pružnou stěnou a jsou motivací pro další výzkum v této oblasti. Získané zkušenosti lze využít k dalšímu upřesňování matematických modelů těchto dějů.

Formální úprava a jazyková úroveň práce

Disertační práce je zpracována v celkovém rozsahu 77 stran, obsahuje 49 literárních odkazů na použité zdroje a 8 odkazů na publikace, v nichž je doktorand prvním autorem nebo spoluautorem. Text je napsán stručně, ale přehledně. Je doplněn grafickým vyhodnocením výsledků měření i CFD simulací. Při formátování grafů bych doporučila zobrazit značky pro hodnoty vynášené na vodorovné ose (zpravidla čas).

Text je rozdělen do 10 kapitol s logickou strukturou. První 4 kapitoly obsahují úvod do problematiky, současný stav poznání, cíle práce a potřebný teoretický základ. Následující kapitoly již popisují vlastní výzkumnou práci doktoranda a dosažené výsledky. Práce je na dobré formální úrovni, bez většího počtu překlepů.

Bylo by vhodné doplnit seznam použitých značení veličin a jejich jednotek.

Připomínky a otázky k rozpravě:

- Lze určit nejistotu měření PIV metodou? Jaké jsou limity a omezení této metody?
- Jakým vztahem je definováno Womersleyho číslo a jaký je jeho význam?
- Bylo by možné pomocí čerpadla simulovat tvar fyziologické tlakové vlny?
- Srovnání měřených rychlostních profilů newtonské a nenewtonské kapaliny v polovině délky skleněné trubice (obr. 14-23) nepřináší jednoznačnou interpretaci. Pro ustálené laminární proudění v tuhém potrubí bychom mohli předpokládat platnost Poiseuillova zákona při dostatečné délce trubice. Vzhledem k periodické činnosti srdce je proudění krve pulzním tokem a profily proudění se mění v průběhu sinusového cyklu. Bylo by vhodné skreslit profily pro stejnou kapalinu a trubici v průběhu jedné periody pro sledování změny tvaru profilu v čase a možné porovnání.
- Ze srovnání rychlostních profilů newtonské a nenewtonské kapaliny v pružné trubici (obr. 30-39) je zřejmé, že dosahují větší shody. Profily jsou v obou případech více ploché v důsledku pružnosti stěny trubice.
- Na obr. 42 a obr. 43 je zobrazeno šíření tlakového pulsu v tuhé a poddajné trubici. Jak byla určena prodleva šíření tlakového pulsu, uvedená v práci na str. 35?
- V práci byla modelována 1/4 průřezu trubice vzhledem k náročnosti a délky výpočtu. Bude se aorta v reálu deformovat symetricky?
- Viskozita byla definována v CFD simulaci pomocí Hershel-Bulkley modelu. Byl testován i jiný model vyjadřující závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti?
- Kde je možná příčina poměrně výrazného rozdílu mezi rychlostními profily získanými pomocí měření PIV a numerickým řešením pro newtonskou i nenewtonskou kapalinu (obr. 85-94 a obr. 100-107)?

Vyjádření k předloženým tezím

Předložené teze disertační práce jsou zpracovány v rozsahu 32 stran. V souvislosti s požadovanou strukturou doporučuji doplnit současný stav řešené problematiky a cíle práce.

Bylo by také vhodné doplnit seznam použitých značení veličin a jejich jednotek.

Závěr:

Předložená disertační práce Ing. Dominika Šedivého řeší aktuální problematiku interakce newtonské a nenewtonské kapaliny s pružnou stěnou v aplikaci na kardiovaskulární systém. Je zpracována dostatečně přehledně, systematicky a formálně správně. Práce rozšiřuje poznatky v dané oblasti, přínos je možno vidět zejména ve využití FSI analýzy obsažené ve výpočtovém prostředí ANSYS. Doktorand prokázal, že má předpoklady pro vědeckou práci, jeho výsledky jsou využitelné pro daný obor a poskytují možnost navázat na dosažené výsledky v pokračujícím výzkumu. Stanovené cíle disertační práce byly dosaženy, práce splňuje požadavky na doktorskou práci ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb., doporučuji ji k obhajobě a po jejím úspěšném ukončení udělení akademického titulu Ph.D.

Ostrava 18. 1. 2023

doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava

