



Oponentský posudek dizertační práce

Autor dizertační práce: Ing. Dominik Šedivý (Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně)

Název dizertační práce: Interakce nenewtonovské kapaliny s pružnou stěnou

Oponent: doc. Ing. Petr Šidlof, Ph.D. (FM TUL, ÚT AV ČR)

Ing. Dominik Šedivý se v dizertační práci věnuje problematice proudění tekutiny ve zjednodušeném modelu aorty. Řešeny jsou varianty newtonovské a nenewtonovské tekutiny, tuhé a poddajné trubice, a to jak experimentálním, tak výpočetním přístupem. Experimentální uspořádání, kde proud kapaliny poháněný membránovým čerpadlem prochází přes měřenou trubici osazenou na vstupu a výstupu tlakovými snímači a ve středu PIV kamerou, je silně inspirováno prací Burgmann et al. (2009), kterou autor korektně cituje. Výpočetní model je sestaven v komerčním sw ANSYS Fluent, a v případě elastické trubice s interakcí také v ANSYS Mechanical, který je se strukturálním řešičem slabě sdružen pomocí modulu System Coupling.

V celé práci autor explicitně nebo implicitně předpokládá axisymetrii problému. Jedná se o častou chybu, kdy na základě rovinné nebo osově geometrické symetrie student předpokládá i symetrii řešení. To platí pro čistě strukturální problémy, obecně ovšem nikoliv pro problémy proudění a FSI! Je možné, že v uvažovaném případě může být vzhledem k nízkým Reynoldsovým číslům a laminárnímu proudění skutečně proud axisymetrický (zejména v případě tuhé trubice), ale také nemusí, a to zejména u pružné silikonové hadice, která se může deformovat z kruhového do eliptického průřezu. Tento fakt by mělo být možné ověřit z experimentu a v práci by měl být podstatně lépe diskutován.

V úvodních dvou kapitolách dizertace autor popisuje dosti stručným, ale jasným a srozumitelným způsobem základní aspekty proudění krve v cévách, přístupy k jeho numerickému a experimentálnímu modelování a rešerši dostupné literatury v této oblasti. V odstavci 1.5 autor uvádí vztah pro rychlost zvuku v pružné trubici, přičemž se odkazuje na skripta [39]. Není mi známo, za jakých předpokladů byl odvozen či změřen součinitel k v uvedených skriptech. Problematika je ve skutečnosti podstatně složitější. Jak je dobře teoreticky analyzováno i experimentálně prokázáno například v článku

Huang, Choy et al. (2000), Experimental study of sound propagation in a flexible duct, *Journal of the Acoustical Society of America* **108** (2), DOI 10.1121/1.429594,

vlny šířící se normální rychlostí zvuku (u běžných tekutin vyšší stovky až tisíce metrů za sekundu) jsou i v pružných trubicích přítomné vždy. Pro hmotnostní číslo $M = M^*/(\rho_f h)$ blíží se jedné (kde M^* je plošná hmotnost stěny, ρ_f hustota tekutiny a h výška kanálu) může dojít k interakci mezi podélným vlněním v tekutině a ohybovým kmitáním pružné stěny. Potom lze v naměřených signálech najít vlny šířící se pomaleji (pro nízké frekvence), nebo naopak podstatně rychleji (pro vysoké frekvence), než normální rychlost zvuku. Tvrdit tedy v dizertaci, že byla naměřena rychlost zvuku 126, respektive 21 m/s (str. 35) považuji přinejlepším za zavádějící, ale spíše za zcela chybnou interpretaci experimentálních dat. Pokud chce autor takovéto závěry v dizertaci uvádět, měl by se do této netriviální problematiky ponořit podstatně hlouběji a nestavět vše pouze na jednom vztahu ze skript.



Čtvrtá kapitola popisuje použité matematické modely, a dále také trochu nelogicky jednu z experimentálních metod (PIV), která patří správně až do páté kapitoly. Popis matematických modelů a numerického řešení je dle mého názoru pod běžnou úrovní dizertační práce na technické fakultě. Autor například píše velmi zjednodušeným způsobem o problému deformace sítě. V textu se objevují nepřesné termíny, které jsou jinak v češtině běžně zavedené („rovnice pohybu“ místo „pohybová rovnice“, „doména“ místo „oblast“). Větší část textu zřejmě vznikla nedokonalým překladem manuálů ANSYS do češtiny. V žádné části čtvrté kapitoly autor nejde do hloubky, popis je povrchní a budí silný dojem, že student problematice ve skutečnosti moc nerozumí.

Experimentální zařízení je v páté kapitole popsáno stručně, ale vzhledem k tomu, že experiment nestavěl sám doktorand, uspokojivě. Chybí frekvenční rozsah diferenčního tlakového snímače Domat SHD 692, který je pro práci důležitý.

Šestá kapitola shrnuje výsledky experimentů, konkrétně měření tlaku na vstupu a výstupu a rychlostní profily uprostřed kanálu získané metodou PIV pro různé varianty (sklo / silikon, newtonovská / nenewtonovská kapalina). Byly použity dva typy snímačů tlaku, z nichž se bohužel oba ukázaly jako ne zcela vhodné. Zajímavé je porovnání průběhů tlaku u pevné a pružné trubice. V závěrečné části kapitoly 6 se doktorand snaží z průběhů signálu na absolutních snímačích tlaku vypočítat rychlost zvuku. Ve svém komentáři k úvodním kapitolám jsem již uvedl, že se nemohu ztotožnit z teoretickými východisky autora. Nesouhlasím ale ani s jeho interpretací naměřených hodnot, kde usuzuje, že v tuhé trubici s kapalinou je rychlost zvuku $c = 126 \text{ m/s}$ a v pružné trubici $c = 21 \text{ m/s}$. Rychlost zvuku v kapalině je dána Newton-Laplaceovým vztahem $c = \sqrt{K/\rho}$, jak sám autor uvádí v odst. 1.5. Pro glycerin lze v údajích výrobců dohledat $K = 4.35 \text{ GPa}$, $\rho = 1260 \text{ kg/m}^3$ a rychlost zvuku vychází cca $c = 1860 \text{ m/s}$. Při všech nedostacích použitých snímačů se lze pouze dohadovat, jaká chyba měření vedla k doktorandem vyhodnocené rychlosti zvuku v tuhé trubici $c = 126 \text{ m/s}$. V případě měření s pružnou trubicí by mohlo jít o nízkofrekvenční limit (viz výše) a je možné, že doktorand naměřil rychlost šíření ohybových vln pružné trubice naplněné tekutinou. Je ale velmi zavádějící nazývat tuto veličinu jako rychlost zvuku. V kontextu toho, že rychlost v tuhé trubici mu vyšla 15x menší než reálná, lze navíc tomuto údaji jen těžko věřit.

Sedmá kapitola je věnovaná simulacím proudění v tuhé trubici. Proudění je uvažováno jako laminární nenewtonovské, což je v daném případě dle mého názoru rozumná aproximace. Numerický model předpokládá symetrii a pro snížení výpočetních nároků modeluje pouze čtvrtinu kanálu. Pro axisymetrické úlohy je ale i toto zbytečné plýtvání výpočetním výkonem. Výpočetní balíky jako OpenFOAM nebo ANSYS Fluent nabízejí možnost řešit úlohu jako 2D axisymetrickou, která má na výpočetní síti s danou velikostí elementů řádově nižší výpočetní nároky než 3D simulace. V celé sedmé kapitole (a v celé dizertaci) není ani jediný obrázek vypočteného proudového pole, pouze rychlostní profily. To vzbuzuje jisté otázky. Rychlostní profily ze simulací v polovině výšky trubice souhlasí poměrně dobře s výsledky PIV měření. Vzhledem k okrajové podmínce na vstupu (předepsaný časový průběh rychlosti získaný z měření) to ale není žádné překvapení a numerický model oproti měření neposkytuje žádné nové informace. Jedinou výjimkou je průběh smykového napětí na stěně (obr. 63), což je zajímavý výsledek umožňující porovnat rozdíl mezi newtonovskou a nenewtonovskou tekutinou.

V osmé kapitole autor popisuje výsledky sdruženého modelu pro proudění v elastické trubici. Oproti tuhé trubici je tentokrát použita pro proudění tlaková okrajová podmínka, což je náročnější varianta.



Autor opět zbytečně místo 2D axisymetrické úlohy modeluje čtvrtinu 3D kanálu, přitom sám zmiňuje, že výpočetní náročnost je na hranici přijatelnosti. Jako nesrozumitelné a podivné se mi jeví vysvětlení, proč bylo nutné ve výpočetním modelu prodloužit trubici o 50% oproti experimentu, aby výsledky souhlasily. Autor mluví o „chybějící setrvačnosti kapaliny“ a o tom, že „hmota vody vytvářela odpor“, což jsou přinejlepším nevhodné formulace, ale ještě spíše zcela špatné úvahy. Kapitola obsahuje zajímavé výsledky, například porovnání objemových průtoků na obr. 95 a 108. Výsledky simulací opět celkem dobře souhlasí s experimentem, což je ale přinejmenším z části důsledek toho, že model byl na experimentální data dost výrazně laděn.

Devátá kapitola je věnována zjednodušenému 1D modelu tlaku a průtoku v elastické trubici, implementovaném v knihovně Octave. Jedná se o velmi dobrý a opodstatněný přístup k problému, zejména pokud je proudění skutečně laminární a axisymetrické. Autorovi se podařilo nalézt takové hodnoty parametrů, kdy 1D a 3D model dávají prakticky stejné výsledky. Pouze poslední odstavec této kapitoly je pro mě nesrozumitelný.

Závěr dizertační práce je psán velmi dobře, problém je pouze v diskuzi ohledně rychlosti zvuku a hybnosti kapaliny (viz výše).

Formální stránka práce je uspokojivá. Výsledky jsou graficky zpracovány v programu Excel základním, ale přijatelným způsobem. Práce obsahuje relativně malé množství jazykových chyb a překlepů, avšak řada vět je formulována poněkud neobratně. Výsledky práce doktoranda byly publikovány v sedmi konferenčních sbornících a v recenzovaném časopisu Slovenské akademie věd *Measurement Science Review*.

Drobné připomínky

V následujícím uvádím seznam konkrétních připomínek, kterým se dle mého názoru není nutné při obhajobě podrobně věnovat:

- odst. 1.2 a další: autor používá v mnoha případech dle mého názoru ne zcela vhodný (spíše na středních školách používaný) způsob citace zdrojů, kdy úplně na konec odstavce až za tečku vypíše několik zdrojů. Ve vědecké literatuře se citace používají spíše jednotlivě a jako plynulá součást textu, kde dokládají dané tvrzení či odkazují na další informace.
- str. 13 – autor mluví chybně o rychlosti „rázové vlny“, což nemá s prací nic společného
- str. 15 – název kapitoly 2 nepovažuji za logický. Současný stav poznání je popsán zejména v kapitole 1, stávající kapitola 2 je spíše shrnutím celé kapitoly 1
- str. 18 – zbytečné a velmi nevhodné používání anglických termínů uprostřed českého textu. K termínům „wavelength“, „polyamid fluorescent“, existují běžně používané české termíny
- str. 20 – není vůbec jasné, co autor myslí „trvalou a měnící se složkou“ pohybu
- str. 23 – autor sám sobě protiřečí – píše, že „měření rychlostních profilů proběhne i na okraji domény“. Na str. 25 je přitom uvedeno, že „Původní záměr měřit rychlostní profily i na okraji domény nebyl dodržen kvůli časové vytíženosti laboratoře“.



- str. 25 – „několik změn v průměru trubice, které by pravděpodobně vedly ke vzniku nestabilit v proudění“: Vedly tedy ke nestabilitám, nebo ne? Pokud ano, jakým? Jak jste se s nimi vypořádal?
- Obr. 14-23: Aby byl obsah obrázků srozumitelný i bez čtení okolního textu, vhodnější by bylo uvést pro všechny tyto podobrázky jediné číslo (obr. 14) a společný titulek, který by tak mohl obsahovat i text vysvětlující, o co v obrázku jde. Časy potom mohou být uvedeny přímo uvnitř podobrázků
- str. 29 – jazykové chyby či překlady v textu (autor si po sobě zřejmě upravené věty nepřčetl): „jak se ukazují výsledky“, „data byla jsou zobrazena“
- str. 39 – celá stránka je tvořena jediným odstavcem. Takto dlouhý nedělený text je nepřehledný a náročný na čtení
- str. 39 – nedokončená věta „Z výsledků experimentů je patrné, že maximální hodnota“
- str. 41 – autor používá snímače tlaku, o nichž na jiném místě píše, že mají přesnost 700 Pa, pro měření hustoty na čtyři desetinná místa
- str. 49 – vágní popis výpočetní náročnosti, kde zcela chybí konkrétní informace (použitý výpočetní hw – výpočetní čas typické úlohy, typ a počet výpočetních jader, velikost RAM, v případě paralelního výpočtu na clusteru informace o interconnectu mezi uzly). 350tis elementů není pro CFD výpočet nijak velké číslo, nemělo by se jednat o nijak zvlášť náročnou úlohu
- str. 64 – „výsledek experimentu simulace proudění krve“ (podivná formulace)

V řadě pasáží bych autorovi doporučil, aby při psaní odborného textu místo ne zcela jasných slovních popisů používal jednoduché matematické vztahy a rovnice. Týká se to zejména popisu okrajových podmínek (např. str. 39: „jako data pro podmínku se použila střední rychlost z měření“ – není jasné, zda jde o časově zprůměrovanou rychlost, prostorově zprůměrovanou rychlost nebo hodnotu rychlosti ve středu kanálu) a dále geometrie a bodových měření veličin (například místo popisu „ve středu trubice“, což může znamenat jak polovinu délky, tak osu trubice, definovat a na obrázku vyznačit souřadný systém a uvést souřadnice). Při souvislém čtení celé dizertace lze většinou význam slov dovodit z kontextu. V případě, že ale čtenář studuje pouze konkrétní části textu nebo obrázky s výsledky, nejsou dané partie srozumitelné.

Otázky k obhajobě

- V rámci první otázky bych rád dal dizertantovi možnost vysvětlit a obhájit svou teorii a přístup k měření rychlosti zvuku v pevné a pružné trubici naplněné tekutinou, a případně v dalších místech, kde jsem jeho práci vystavil zásadnější kritice.
- Vysvětlíte, zda byl předpoklad axisymetrického proudění a deformace pružné trubice nějakým způsobem experimentálně ověřen (například PIV měřením ve více rovinách, nebo sledováním deformace hadice z více pohledů).
- Ukažte alespoň jeden příklad simulovaného proudového pole pro tuhou a pružnou trubici.



Závěr

Interakce proudění s pružnou stěnou trubice, navíc pro případ newtonovské i nenewtonovské tekutiny, představuje náročný a aktuální problém. Autor k němu navíc přistupuje jak výpočetním, tak experimentálním způsobem. Popis použitých metod v předložené dizertační práci i tezích bohužel vykazuje řadu nepřesností, jeví se jako povrchní a je z něj patrné, že ani numerickým simulacím, ani experimentu autor nerozumí příliš do hloubky. Některé závěry práce jsou dle mého názoru chybné. Přestože mám k předložené dizertaci výhrady, lze konstatovat, že autor dosáhl jistých původních výsledků, které mohou být přínosem pro vědeckou komunitu. Předložený text splňuje základní požadavky na dizertační práci na technických fakultách. Cíle práce byly splněny. Doporučuji, aby pan Dominik Šedivý měl příležitost přistoupit k obhajobě a před komisí svoji dizertační práci obhájit.

V Liberci dne 9. 2. 2022

Petr Šidlof