

Oponentský posudek habilitační práce

Autor: MUDr. Aleš Hejčl, PhD.

Název práce: Modelace hemodynamiky a její potenciální přínos pro chirurgickou léčbu intrakraniálních aneurysmat

Pracoviště: Univerzita Karlova v Praze, 1. lékařská fakulta

Předložená práce na 101 stranách popisuje možnosti využití numerických modelů proudění krve v léčbě intrakraniálních aneurysmat. Jako matematik se mohu těžko vyjádřit k významu práce v medicíně a proto se v posudku zaměřím především na její matematické aspekty.

Numerické výsledky používané v práci byly získány především díky spolupráci s odborníky z Matematického ústavu Univerzity Karlovy a Mayo Clinic v Rochesteru, MN, U.S.A. Proudění krve v aneurysmatech a v okolních cévách se numerický počítá následujícím způsobem. Data získaná pomocí angiografických vyšetření jednotlivých pacientů jsou ručně segmentována s cílem získat skutečnou trojrozměrnou geometrii cévního řečiště. Tato geometrie je potom vysítovaná, aby se na ní pomocí metody konečných prvků vyřešily Navierovy-Stokesovy rovnice modelující proudění nestlačitelné vazké kapaliny. Z vypočteného proudového pole se následně počítají vhodné charakteristiky, které se analyzují s cílem spolehlivě zhodnotit riziko ruptury sledovaného aneurysmatu.

Přestože se používají nejnovější poznatky z oblasti matematického modelování a numerických metod, je třeba zdůraznit, že jde o poměrně jednoduchý model skutečného proudění krve, viz podrobnější rozbor v části 7.5. Krev je velmi složitá tekutina s nelineárním chováním, které použitý lineární model nemůže přesně vystihnout. Navíc se cévní stěny modelují jako pevné trubky. Ve skutečnosti jsou však elastické, proudící krev jimi pohybuje a jejich pohyb zpětně ovlivňuje proud krve. Výsledky také ovlivňuje celá řada nepřesností ve vstupních datech jako například nepřesně segmentovaná geometrie cévního řečiště, neznámý proudový profil na vstupu, a nejjisté materiálové parametry krve. Vlivu nepřesností v geometrii na výsledné proudové pole se věnuje část 6.7, kde se dochází k závěru, že i malé rozdíly ve tvaru cévního řečiště mohou mít významný vliv na sledované hemodynamické parametry. Z toho lze usuzovat, že i nahrazení pevných cévních stěn elastickými může mít potenciálně významný vliv na vypočtené proudové pole.

Krev byla v práci modelována jako homogenní Newtonovská kapalina o hustotě 1050 kg/m^3 s dynamickou viskozitou $0,0035 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (nikoli Pa/s , jak je mylně uvedeno na str. 41). Výjimkou je ovšem část 6.7, kde se používá hustota 1000 kg/m^3 a dynamická viskozitou $0,00371 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (v práci ovšem vyjádřeno v ekvivalentních jednotkách $\text{g/mm}\cdot\text{s}$). Proč se v různých částech práce používají nepatrně rozdílné parametry krve?

Interakce elastické stěny s proudící krví lze matematicky modelovat pomocí sdružené úlohy lineární elasticity a Navierových-Stokesových rovnic. Podobně nelineární chování krve lze vystihnout sofistikovanějšími rovnicemi proudění. Nicméně komplexita řešené úlohy by tím neúměrně vzrostla a s použitými výpočetními prostředky už by ji nebylo možné vyřešit. Proto hodnotím zvolený přístup jako velmi vhodný a adekvátní řešenému problému.

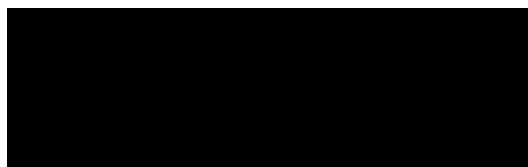
Po formální stránce je práce na velmi dobré úrovni. Výborně pracuje s literaturou. U všech důležitých tvrzení najdeme vhodnou citaci. Statistické výsledky jsou vhodně prezentovány formou tabulek a výsledky numerického modelování trojrozměrného proudění krve jsou graficky zobrazovány prostřednictvím velmi kvalitních obrázků. V práci se vyskytují překlepy a formulační nedostatky, které však nepředstavují žádný problém pro přesné pochopení textu. Kvalitu práce trochu snižuje faktmothes

. Např. dva odstavce na str. 18 jsou totožné s prvními dvěma odstavci sekce 5.7 nebo čtyři věty na straně 59 jsou totožné se čtyřmi větami na str. 65. Míra tohoto sebe kopírování je ovšem malá a proto bych to nepovažoval za problém.

Velký význam spatřuji především v ojedinělé spolupráci týmu lékařů a matematiků. Jde o krásnou ukázkou úspěšné aplikace moderních matematických metod v medicíně. Novost a významnost získaných výsledků z lékařského hlediska nemohu posoudit, přesto je zřejmé že tato práce minimálně potvrzuje a rozšiřuje dřívější pozorování jiných autorů. Z matematického pohledu jsou použité modely a metody standardní, nicméně na hranici současného stavu poznání v několika oblastech výpočtové matematiky. Jejich aplikace na trojrozměrné modelování proudění krve v aneurysmatech a okolních cévách je technicky velmi náročná. Je zřejmé, že bylo nutné překonat řadu technických překážek, přestože to práce explicitně nezmiňuje. Po několikaletém úsilí týmu odborníků se ale nakonec podařilo získat originální, jedinečné a slibně výsledky.

S těchto důvodů rozhodně doporučuji práci přijmout v předložené formě a na jejím základě doporučuji udělit MUDr. Aleši Hejčlovi, PhD. titul docent v oboru neurochirurgie.

V Praze dne 12. srpna 2019



doc. RNDr. Tomáš Vejchodský, Ph.D.
Matematický ústav AV ČR, v. v. i.
Žitná 25, 115 67 Praha 1