

Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.
Radomská 469
18100 Praha 8

O p o n e n t n í p o s u d e k

disertační práce Ing. Tomáše Tisovského : *Využití termoakustického jevu k chlazení mikroelektronických zařízení*, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Liberec, 2021.

Předložená disertační práce obsahuje včetně titulního listu, Prohlášení, anotací v jazyce českém a anglickém, cílů disertační práce, Poděkování, Obsahu, Seznamu veličin a Seznamu zkratk, vlastního textu disertační práce a seznamu použité literatury, v němž je 96 citovaných pramenů, a seznamu vlastních publikací autora 113 stran.

Tématem práce je výzkum termoakustického jevu a možnost aplikace tohoto jevu na chlazení mikroelektronických zařízení.

V úvodu jsou popsány fyzikální principy chlazení zejména mikroelektronických zařízení. Je stručně uvedeno chlazení s využitím termoakustického jevu.

Druhá kapitola je zaměřena na akustické procesy jak s popisem lineárním tak i nelineárním.

Ve třetí kapitole jsou stručně uvedeny základy termoakustiky se zaměřením na princip termoakustického chlazení se stojatým vlněním.

Čtvrtá kapitola uvádí termoakustická zařízení umožňující chlazení mikroelektronických zařízení včetně návrhu významných komponent. Jsou diskutovány možnosti miniaturizace rozměru rezonátoru.

V páté kapitole jsou popsány modely – akustický model rezonátoru a jednorozměrný termoakustický model chladicího zařízení. Výpočty umožnily získat údaje o provozních parametrech a jejich průběhu podél zařízení při ustáleném režimu.

Šestá kapitola obsahuje matematický popis proudění stlačitelné tekutiny, uvádí termodynamické a termofyzikální údaje pro numerickou simulaci. Jsou popsány prostorová a časová diskretizace pro řešení metodou konečných objemů. Výpočtový kód OpenFOAM je využit k modelování akustických procesů. Jsou využity metody simulace s dynamickou sítí a modelování procesu v rezonátoru v neinerciální vztažné soustavě.

Dosažené výsledky z numerických simulací akustických procesů jsou uvedeny a diskutovány v sedmé kapitole. Fourierova analýza poskytuje údaje z výsledků výpočtu o frekvencích a o amplitudách tlaku. Další výsledky dávají údaje o průběhu akustického tlaku a objemového toku a o průběhu rychlosti a teploty při šíření vlny. Výsledky výpočtů jsou jak pro lineární tak i pro nelineární režimy rezonančního buzení.

Osmá kapitola uvádí a diskutuje dosažené výsledky se zaměřením na termoakustické procesy. Jsou vyhodnoceny průběhy středních hodnot hustoty tepelného toku mezi pracovním plynem a komponentou chladicího zařízení. Opět jsou uvedeny oba případy – lineární a nelineární režimy. Je uveden trojrozměrný termoakustický model a jsou porovnány dosažené výsledky.

V závěru jsou shrnuty zkušenosti dosažené při analýze termoakustických zařízení a je ukázáno, že metody vycházející z numerických modelování v mechanice tekutin jsou vhodné pro výzkum termoakustických procesů v miniaturních zařízeních.

Jsou vytyčeny možnosti pro další zaměření výzkumu. Numerické simulace otevírají možnosti pro zvláštní témata pro miniaturizaci a pro geometrické varianty zařízení.

Hodnocení :

Jedním z hraničních oborů ve fyzice mezi mechanikou a naukou o teple je obor termoakustika. Rozvoj termoakustiky dostává v současné době podněty hlavně ze zaměření technických oborů na sdílení tepla. Intensifikace přenosu tepla je závažným tématem, jehož řešení musí mít příznivý dopad na rozvoj, stavbu a provoz hlavně mikroelektronických zařízení. Autor disertační práce zformuloval na základě dostupných informací z literárních zdrojů čtyři hlavní cíle jeho disertační práce – popsat současné metody chlazení mikroelektronických zařízení a diskutovat využitelnost termoakustického jevu k chlazení, analyzovat fyzikální jevy uplatňující se při aplikaci termoakustiky k chlazení mikroelektronických zařízení, navrhnout a ověřit proceduru modelování miniaturních termoakustických zařízení a dosažené výsledky názorně vyjádřit a diskutovat je. Autor disertační práce si je vědom toho, že se jeho výzkum nutně dostane do situace, kdy efekty s nelineárním popisem a charakterem budou dominantní a kdy bude muset zvažovat prostorová teplotní pole v termoakustickém zařízení. Lineární popis akustických procesů má význam pro porozumění vlivu významných parametrů a řešení těmito modely dávají ve výsledcích aproximaci nebo data pro porovnání při dalším potupu výzkumu. Autor disertační práce uvedl tři procesy, které v akustice působí jako nelineární. Jsou to popisy střední hodnoty vektoru rychlosti v čase, dále to jsou vyšší harmonické složky a turbulence. Numerická simulace procesů, jak ji autor disertační práce předkládá, se zakládá na základních bilančních rovnicích dynamiky plynů doplněných zákony ze sdílení tepla a termodynamickými konstitutivními vztahy. Výpočty jsou zaměřeny na termoakustický model, který vzešel z autorova návrhu. Dosažené výsledky užitím kódu OpenFOAM jsou uvedeny a diskutovány. Autor disertační práce postupoval správně a řešením dosáhl pozoruhodné výsledky, které ukazují, že lze modelovat termoakustické procesy a navrhovat miniaturní zařízení, v nichž se pro chlazení termoakustické procesy uplatňují. Nutno uvést, že jeho přístup se zakládá na teoretických východiscích a na numerických simulacích a že experimentální data pro ověření zatím nejsou dostupná. Dosažené výsledky jsou pozoruhodné a podnětné a určitě na ně budou navazovat další výzkumné práce. Autor splnil vytyčené cíle.

Oponovaná práce je psána srozumitelně, s menším počtem překlepů, nedůsledností, formálních chyb. Lze uvést jako příklad rovnici (6.6) na straně 61. To není rovnice pro nestacionární vedení tepla, ale pro stacionární vedení tepla a dokonce je to rovnice pro vektor hustoty tepelného toku. Oponent zmiňuje, že v disertační práci jsou i drobné prohřešky v gramatice a prohřešky proti stylu psaní odborných textů v češtině. Jsou jimi například desetinné tečky v diagramech, popisy tabulek psané pod tabulkami atd. Autor disertační práce jistě v dalších publikacích může tyto drobné nedostatky překonat. Oponent uvádí, že tyto drobnosti nijak nesnižují dobrou úroveň oponované disertační práce.

Oponent pro obhajobu klade tyto otázky :

- 1) Oponent se těžko smiřuje s pojmem „slabé turbulentní proudění“. Může autor disertační práce tento pojem vysvětlit? Jsou známy pojmy „proudění s nízkou intenzitou turbulence“ nebo „proudění s nízkou hodnotou intermitence“.
- 2) Na stranách 73 a 79 jsou diagramy zobrazující rozložení rychlosti a teploty ve čtyřech fázích periody oscilací hélia v místě vestavěné komponenty. Na těchto rozloženích je zřetelné překmitnutí v blízkosti stěny. Může autor disertační práce vysvětlit význam těchto překmitnutí právě pro termoakustický jev? Nemají tato překmitnutí spojitost spíše s aplikací matematické aproximace výsledků rychlé Fourierovy analýzy známé jako Gibbsův jev?
- 3) Diskutoval a posuzoval autor disertační práce své výsledky i z hlediska vjemu zvuku v okolí termoakustického zařízení?

Čtenář tohoto posudku a předložené disertační práce si jistě všimnul, že oponent se záměrně vyhnul pojmenování významné součásti termoakustického zařízení „stacku“. Použil termín „vestavěná komponenta“. Pojem „stack“ je v disertační práci užíván velmi často. V češtině dvojsouhláska „ck“, když není následována samohláskou, je nepřirozená. Oponent je toho názoru, že i disertační práce jsou významné pro zavádění nových pojmů, pro zušlechťování i odborného jazyka. Oponent vyzývá k diskusi mezi českými odborníky k prosazování výstižné a přirozené odborné češtiny. V tomto případě, který vyvstal s termoakustickým zařízením, se nabízí „počestit“ ten název na „stak“. Určitě oponent nedoporučuje vytvořit název ženského rodu „stacka“. Dalo by se diskutovat o názvech „příhrada“, nebo „šteláška“, a j..

Závěr :

Předložená disertační práce je určitě přínosná pro výzkum především v oboru termomechaniky i v dalších oborech, kde poznatky z termoakustiky lze využít. Autor splnil stanovené cíle tím, že vytvořil a numerickými simulacemi ověřil návrh procedury modelování termoakustických zařízení a provedl numerické simulace termoakustických procesů. Ukázal na možnost aplikace termoakustického jevu k intenzifikaci sdílení tepla z mikroelektronických zařízení. Jeho disertační práce je podnětná a bezpochyby budou na ní navazovat další výzkumné práce a budou se z ní odvíjet další možnosti pro praktické aplikace. Autor prokázal svojí tvůrčí aktivitu a své velmi dobré odborné znalosti v oborech termomechaniky a numerických simulací. Oponent

doporučuje disertační práci Ing. Tomáše Tisovského k obhajobě
před komisí pro obhajoby disertačních prací v doktorském studijním programu Strojní inženýrství, studijním oboru Aplikovaná mechanika a doporučuje, aby po úspěšné obhajobě byl Ing.T.Tisovskému udělen akademicko-vědecký titul

Philosophiae doctor (PhD:).

V Praze 19. dubna 2021

Oponentský posudek dizertační práce

Autor dizertační práce: Ing. Tomáš Tisovský

Studijní program a obor: P2301 Strojní inženýrství, Aplikovaná mechanika, FS TUL

Název dizertační práce: Využití termoakustického jevu k chlazení mikroelektronických zařízení

Oponent: doc. Ing. Petr Šidlof, Ph.D.

Dizertační práce Ing. Tomáše Tisovského se zabývá chlazením na principu termoakustického rezonátoru. V prvních čtyřech kapitolách autor celkem přehledně a srozumitelně shrnuje možnosti chlazení elektronických zařízení, rovnice lineární a nelineární akustiky a princip termoakustického chlazení v rezonátoru se stojatou vlnou. V páté kapitole je naznačeno modelování termoakustických procesů ve volně dostupném software DeltaEC, který byl vyvinut v Los Alamos National Laboratory a který je považován za standardní nástroj pro 1D simulace termoakustických rezonátorů. Není zde bohužel vůbec vysvětleno, jaký matematický model, jaké předpoklady a jakou numerickou metodu kód DeltaEC využívá (útržky informací lze nalézt pouze o tři kapitoly dříve v odst. 2.2.2 „Vyšší harmonické složky“). Šestá kapitola je věnována řešení termoakustických problémů ve 2D a 3D vlastním modelem vytvořeným v open-source knihovně OpenFOAM. V sedmé a osmé kapitole jsou potom shrnuty a porovnány výsledky simulací pomocí obou metod na případě 2D rezonátoru bez stacku, respektive 2D/3D modelu rezonátoru se stackem. Popisy výsledků jsou často poměrně strohé, s minimálním komentářem a snahou o interpretaci, věty se doslovně opakují. Práce končí rozsáhlou závěrečnou kapitolou, která je naopak sepsána výborně. Zde autor shrnuje obsah práce a velmi dobře formuluje a diskutuje závěry, jejich důsledky a možnosti další práce.

Za hlavní přínos práce považuji sestavení a ověření modelu termoakustických jevů založeného na řešení Navier-Stokesových rovnic pro stlačitelné proudění v prostředí OpenFOAM. Autor navrhuje dva chytré přístupy, jak si poradit s okrajovou podmínkou pro buzení stojaté vlny na levém konci rezonátoru: metodu využívající dynamické sítě a buzení pomocí objemové síly v rovnici pro hybnost. Použita a prezentována je pouze druhá z výše jmenovaných metod. Ve výsledcích autor prokazuje velmi dobrou shodu výsledků predikovaných vlastním modelem s výstupy software DeltaEC.

Za nejslabší stránku práce považuji její strukturu, která z mého subjektivního pohledu není zcela logická, a způsob prezentace obecně. Názvy kapitol jsou dle mého názoru spíše matoucí a ztěžují orientaci v práci. Jako jeden konkrétní příklad bych uvedl kapitolu 1.5 „Vymezení postupu řešení“. Ta obsahuje pouze jedinou podsekcí „Vsuvka z fyziky mikrosvěta“, která logicky patří k odstavci 1.4.2., a o postupu řešení zde není ani slovo. Jenom málokdy autor na začátku jednotlivých kapitol a odstavců vysvětluje proč a čemu se daná pasáž bude věnovat. Čtenář tak často pochopí, o co vlastně šlo, až na konci kapitoly nebo v závěru celé dizertace.

Formální stránka práce i jazyková úroveň textu je velmi dobrá. Práce obsahuje minimum překlepů (přestože i ty by se daly pomocí prosté automatické kontroly pravopisu odstranit). Menší připomínku bych měl k odkazům na literaturu, které autor umísťuje až za tečku ukončující věty, a k odkazům na rovnice, které nejsou v kulatých závorkách a pletou se tak s odkazy na kapitoly. Jinak ale autor pracuje s literaturou velmi dobře.

Níže uvádím seznam drobnějších připomínek, kterým není nutné se při obhajobě podrobně věnovat:

- odstavec 1.1: Poslední věta odstavce je podivně vložena bez souvislosti s předchozím textem. Jednotku tepelného toku je v textu lepší sázet jako W/mm^2 .
- Tab. 1.1: chybí jednotky u koeficientu přestupu tepla
- str. 18: nejasně formulované a nepřesné vysvětlení termoelektrického jevu (jde o vodiče, nikoliv polovodiče)
- rovnice (2.1) – zákon zachování hybnosti v diferenciální formě: chyba v posledním členu vpravo ($\mu \vec{v}$)
- str. 23, věta „Převedením rovnice 2.4 na ..“. Místo pokusu o slovní vysvětlení rovnic by bylo daleko jasnější a srozumitelnější tyto rovnice napsat





- rovnice (2.7) a (2.8): logičtější by bylo nejprve uvést vztah mezi absorpčním koeficientem a relaxačním časem, potom vztah pro relaxační čas a ten nakonec dosadit. V této formě musí čtenář dost přemýšlet, proč je vůbec rovnice (2.7) uvedená, když není relaxační čas nikde dál explicitně použit
- str. 27 – poslední věta: naprosto nejasná souvislost mezi vlivem nelineárních členů a vztahem pro $\cos^2(\phi)$
- rovnice (3.3) vs. Obr. 3.5: nekonzistentní značení osy rezonátoru (z vs. x)
- str. 40-41: polovina odkazů na obrázek 4.1 ve skutečnosti má být na obr. 4.2. Není jasné, co znamená „zařízení dle návrhu 4.1“. Myslí se tím obr. 4.1, obr 4.2 nebo odst. 4.1?
- str. 41: opravdu myslí autor délku rezonanční dutiny 0.9 mm? Pokud je médiem vzduch, má být zřejmě 0.9 cm
- str. 42: přestože se kapitola 4.2 jmenuje „Návrh zařízení“, úvahy jsou velmi nekonkrétní. Například ohledně tvaru rezonátoru se dozvídáme pouze to, že má „zásadní vliv na efektivitu zařízení“.
- str. 48: nikde není vysvětleno, co je to „porovnávací rezonátor“ a jaký je jeho účel. Pravděpodobně jde o zjednodušenou geometrii bez stacku, které je potom věnována kapitola 7. To ovšem z textu ani názvů kapitol není vůbec zřejmé.
- str. 60, třetí odstavec: má být $Kn < 0.001$ (o něco dál v tabulce již je správně). Celkově je kapitola 6.3.1 v pořádku, ale neplyne z ní pro práci žádný důsledek. Není ani zmíněno, v jakém režimu Knudsenova čísla se zařízení uvažovaná v práci pohybují
- obr 6.1, 6.2, 6.3: chyba diskretizace není příliš zajímavá veličina. Je zcela zbytečné uvádět v práci dva naprosto identické grafy (jediný rozdíl mezi 6.1 a 6.2 je to, že první je pro celou periodu, druhý pro půl periody) a třetí velmi podobný
- str. 74: počítat Fourierovu transformaci ze signálu o délce jedné periody základní frekvence nedává smysl, pravděpodobně je text špatně formulován
- odst. 7.1.4, 7.2.3, 8.3.3, 8.4.3: čtyřikrát doslovně se opakující text s obrázkem přes půl stránky, nesrozumitelný název odstavce
- odst. 8.1.1: Autor ne zcela pochopitelně (zejména vzhledem k předcházející připomínce) šetří místem a neuvádí žádné číselné údaje ani obrázek výpočetní sítě
- tab. 8.1: okrajové podmínky jsou uvedeny nepřesně a neúplně: 1) $\nabla p \cdot \vec{n}$ nemá jednotky Pa, 2) chlazená i ohřívající stěna mají stejné teploty? 3) proč je na chlazené a ohřívající stěně slip podmínka $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$? Dosud byla řeč o $Kn \ll 0$. 4) Nekonzistentní popis částí hranice v tab. 8.1 a na obr. 8.1
- odst 8.1.4: tvrzení je správné, ale reference [90] nevhodná – nelze srovnávat nestacionární úplav za obtékáním válcem s prouděním mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Zde je 2D aproximace opodstatněná a mnohem méně se vzdaluje od reality

Otázky k obhajobě

- Vysvětlete, na základě jakého matematického modelu (rovnice) a jaké numerické metody pracuje software DeltaEC.
- Byla pro modelování termoakustických rezonátorů vyzkoušena i první popsání metoda, tj. metoda pohyblivých sítí? Řešení Laplaceovy rovnice v OpenFOAM ve skutečnosti nepředstavuje zásadní problém z hlediska implementace ani časové náročnosti. Řešení deformace sítě zabere u nestlačitelných simulací typicky 10% výpočetního času, u stlačitelných pravděpodobně ještě méně. Na základě čeho byla zvolena v případě druhé metody (rezonančního buzení) zvolena amplituda a_0 a frekvence $f = \omega/(2\pi)$ z rovnice (6.19) a jaké měly hodnoty? Je tato frekvence rovna 9519 Hz ze spektra na obr. 7.1? Pokud ano, jaký má smysl tuto frekvenci porovnávat s výsledkem z DeltaEC?
- Odst. 7.2.2 obsahuje velmi zajímavou analýzu akustických středoproudů. Ukažte a okomentujte rychlostní pole ve 2D řezech x-z a y-z s proudnicemi, případně vektory, kde barva odpovídá velikosti středované rychlosti (nikoliv tlaku).





- Jaká úskalí a výzvy vidíte při sestavení případného experimentu, který by mohl potvrdit výsledky numerických modelů? Bylo by možné realizovat jednoduchý termoakustický chladič pomocí levného uspořádání se vzduchem jako pracovním médiem (viz např. experiment Millersville University <https://www.millersville.edu/physics/experiments/008/index.php>)?
- V žádném z modelů není uvažováno vedení tepla ve stacku. Jedná se zřejmě o rozumné zjednodušení, přesto bych se rád zeptal, jak velký vliv by za jakých okolností mohl mít tento děj na výsledky. Jakým přístupem by bylo možné stávající model rozšířit, aby modeloval i tento fyzikální jev?

Závěr

Přes jisté nedostatky ve způsobu a logice prezentace myšlenek a výsledků považuji tuto dizertaci za kvalitní, přínosnou a zajímavou práci. Autor prokázal hluboké znalosti v oblasti fyziky a numerického modelování přenosu tepla a hmoty. Dizertace představuje solidní základ pro další výzkum v náročné oblasti výzkumu a modelování termoakustických dějů. Schopnost samostatné práce doktoranda dokládá i rozsáhlý seznam publikací v konferenčních sbornících, přestože ne všechny články přímo souvisí s tématem dizertace. Vytyčené cíle byly splněny. Dizertační práci doporučuji k obhajobě.

V Liberci dne 12. 4. 2021

Petr Šidlof



doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Technická 4
160 00 Praha 6

OPONENTSKÝ POSUDEK

disertační práce

Autor: **Ing. Tomáš Tisovský**

Téma práce: **Využití termoakustického jevu k chlazení mikroelektronických zařízení**

Posuzovaná disertační práce má 113 stran. Obsahuje 12 tabulek, 54 obrázků, seznam 96 použitých zdrojů a seznam 11 publikací autora.

Aktuálnost tématu disertační práce

Z textu uvedeného v kapitole 1 je zřejmé, že využití termoakustického jevu k chlazení je aktuálním problémem, který byl a je široce studován. Autor dokumentuje, že v rámci výzkumu bylo postaveno několik chladicích zařízení pro chlazení mikroelektronických zařízení, která byla založena na termoakustickém jevu. Je zřejmé, že termoakustické chladicí zařízení má potenciál využití ve speciálních aplikacích.

Dosažení stanovených cílů

Autor si klade několik cílů disertační práce. Chce shrnout metody chlazení mikroelektronických zařízení a diskutovat využitelnost termoakustického jevu při chlazení mikroelektronických zařízení. Tento cíl autor podle mého názoru splnil již v první kapitole disertační práce. Dalším cílem je analyzovat fyzikální jevy uplatňující se při aplikaci termoakustiky k chlazení mikroelektronických zařízení. Související fyzikální jevy popisuje autor ve druhé a ve třetí kapitole obecně. Důsledky miniaturizace související s aplikací na chlazení mikroelektronických zařízení jsou popsány v kapitole 4.3. Autor chce také navrhnout metodiku modelování termoakustických zařízení a tu validovat. Modelování termoakustických zařízení je podle mého názoru hlavním těžištěm disertační práce. Validaci použité metodiky není podle mého názoru možné provést bez experimentálních dat, která nejsou podle tvrzení autora k dispozici. Validaci získaných výsledků na problémech lineární akustiky a termoakustiky považuji pouze za dílčí splnění stanoveného cíle.

Cíl vizualizovat a diskutovat výsledky mi nepřijde potřebné uvádět, to je něco, co považuji za samozřejmé.

Vhodnost použitých metod řešení

Metody řešení byly dle mého názoru zvoleny a použity správně. Při řešení jednotlivých částí disertační práce doktorand použil teoretické a numerické metody a analyzoval získané výsledky. Hlavní těžiště práce se týká využití nástrojů počítačové dynamiky tekutin.

Přínos disertační práce

Z mého pohledu je možné v disertační práci nalézt řadu přínosů. Jedním z přínosů je teoretický rozbor studované problematiky, kde jsou naznačeny další cesty vylepšení modelu při miniaturizaci termoakustických zařízení. Hlavním přínosem je v programu OpenFOAM vytvořený model termoakustického zařízení, kde autor podrobně studuje a diskutuje získané výsledky.

Formální úroveň disertační práce

Práce je z formálního pohledu na vysoké úrovni. Výhrady mám k tomu, že autor v práci necituje svoje publikace. V seznamu publikací autora, který je uveden na konci práce, je několik publikací, které souvisejí s tématem disertační práce a mohou být v práci citovány.

Vyjádření k publikacím autora disertační práce

Na konci disertační práce je uveden seznam jedenácti publikací autora. Většinou se jedná o konferenční příspěvky a je škoda, že v seznamu není publikace v časopise. Domnívám se, že výsledky prezentované v disertační práci mohou být publikovány v časopise.

Poznámky k disertační práci

Autor v práci často používá termín amplituda výchylek, kde předpokládám, že má na mysli výchylky částic kontinua v Lagrangeovském smyslu. Domnívám se, že rovnice 6.1 a rovnice 6.15 nejsou zcela obecné s ohledem na řešení systému rovnic, který popisuje proudění stlačitelné tekutiny a je uveden na straně 61. V rovnici 6.9 je uvedena druhá viskozita a není jasné jakým způsobem s ní autor pracuje. Autor uvádí při popisu modelu závislosti měrné tepelné kapacity, viskozity a tepelné vodivosti na teplotě a nijak nezdůvodňuje potřebnost tohoto postupu. Autor odhaduje chybu diskretizace pro případ stojatého vlnění na straně 64 a 65, ale nevšiml jsem si, že by se v práci zabýval studiem vlivu sítě na numerické řešení. K řešení tlakového pole používá autor algoritmus PIMPLE, který je založen na metodách, které slouží k řešení proudění nestlačitelné

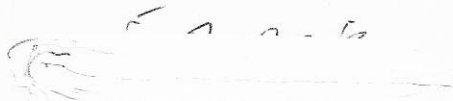
tekutiny. Z textu práce však plyne, že autor řeší proudění stlačitelné tekutiny. Domnívám se, že při řešení za použití dynamické sítě je výchozí systém rovnic modifikován a neodpovídá tomu co je uvedeno v práci.

Otázky a poznámky k obhajobě

- 1) Z jakého důvodu je v rovnici 6.4 a 6.7 zahrnut hydrostatický tlak?
- 2) Zdůvodněte potřebu uvažovat ve Vašem modelu závislost měrné tepelné kapacity, dynamické viskozity a tepelné vodivosti na teplotě.
- 3) Podrobně vysvětlete způsob odhadu chyby diskretizace, který uvádíte na straně 64 a 65.
- 4) Vysvětlete, jakým způsobem funguje použitý algoritmus numerického řešení s ohledem na řešení tlakového a teplotního pole. Jak je použita stavová rovnice.
- 5) Vysvětlete, co je to tlaková oscilační podmínka, která je zmíněna na straně 67.
- 6) Podrobně vysvětlete význam rovnice 8.1. Podle mého názoru se nejedná o tok tepla, ale o tok energie. Není mi jasné, proč je uveden energetický tok, když dále uvádíte, že je podstatná jenom část týkající se tepelného toku.

Práci doporučuji k obhajobě a v případě úspěšné obhajoby doporučuji udělení akademického titulu Ph.D.

V Praze dne 20.4.2021



doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.