

**Zadavatel posudku:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní

## **Oponentní posudek disertační práce**

**Ing. Vladimíra Hrice**

zpracované na téma

### **Numerické řešení proudění mokré páry s nerovnovážnou kondenzací**

K posouzení byla předložena disertační práce o rozsahu 118 stran, která je členěná do šesti kapitol včetně úvodu a závěru. Dále obsahuje seznam obrázků, seznam tabulek, soupis použitých konstant a označení veličin a poměrně rozsáhlý seznam použité literatury, jehož součástí je i 9 odkazů na vlastní publikace doktoranda a jeho školitele, popř. dalších spoluautorů, ke sledované problematice. Jedná se o 3 velice kvalitní články publikované v prestižních mezinárodních časopisech s IF a dále o 6 příspěvků z mezinárodních konferencí, jejichž sborníky jsou indexovány v databázích WoS nebo Scopus. Je zřejmé, že publikační aktivita doktoranda je nadprůměrná.

Disertační práce se zabývá matematickým modelováním a numerickým řešením proudění mokré páry s nerovnovážnou kondenzací ve 3D, přičemž do numerického modelu je implementována reálná stavová rovnice páry IAPWS-95 pro metastabilní oblast. Matematický model dvoufázového proudění je v tomto případě tvořen jedno-tekutinovým disperzním modelem směsi páry a rozptýlených kapek popsaným nelineárním systémem Eulerových rovnic ve 3D, který je doplněn o čtyři rovnice momentů distribuční funkce velikosti kapek. Je uvažován jak vztah pro rychlost nukleace podle sice zjednodušené, ale v technické praxi používané klasické teorie nukleace, tak i kombinovaný model růstu kapek, který zohledňuje různé režimy proudění v širokém rozsahu Knudsenových čísel. Pro numerické experimenty byly implementovány původní algoritmy a byl vyvinut vlastní software umožňující řešit tento typ proudění na nestrukturovaných sítích. Numerické řešení popsaného matematického modelu je založeno na metodě konečných objemů prvního řádu v prostorové diskretizaci. Časová diskretizace vzniklého systému nelineárních obyčejných diferenciálních rovnic je založena na myšlence Godunovova rozkladu, který je efektivní právě v případě, kdy konvektivní část a zdrojová kondenzační část uvažovaného systému rovnic vyžadují volit řádově rozdílné časové kroky při výpočtu. Pro časovou integraci konvektivní části systému rovnic byla použita implicitní LU-SGS metoda a pro výpočet numerického toku bylo použito HLLC schéma. Časová integrace zdrojové kondenzační části systému byla realizována explicitní Rungeovou-Kuttovou metodou vyššího řádu přesnosti. Sestavený matematický model a navržený způsob jeho numerického řešení byl s úspěchem testován na vybraných problémech proudění v nízkotlakých (Barschdorffova) a vysokotlakých (Bakhtarova a Gyarmathyho) dýzách a v parní turbíně s Whitovou geometrií lopatek pro nízkotlaké režimy. Právě na těchto problémech bylo možné do jisté míry porovnat dosažené numerické řešení s dostupnými experimentálními daty publikovanými v literatuře. Bylo rovněž provedeno srovnání numerických výsledků získaných pro reálnou stavovou rovnici páry a pro případ ideální stavové rovnice plynu.

#### **Hodnocení disertační práce:**

Po prostudování disertační práce mohu zcela zodpovědně konstatovat, že se po odborné stránce jedná o velice kvalitní disertační práci. Je naprosto evidentní, že téma, kterému se doktorand ve své disertační práci věnuje a které dále rozvíjí, patří i

v mezinárodním kontextu k velice aktuálním a z hlediska základního výzkumu vědecky závažným problémům s vysokým aplikačním potenciálem. Jedná se o multioborové téma se značným přesahem do oblasti termodynamiky, mechaniky tekutin a numerické matematiky. Všechny cíle jasně formulované v úvodu disertační práce byly úspěšně splněny. Kapitola 2 společně s odstavcem 3.2 je podle mého názoru klíčová pro následné vytváření složitého, i když do jisté míry zjednodušeného, matematického modelu proudění mokré páry s nerovnováznou kondenzací a reálnou termodynamikou. Je zde obsažena řada zásadních poznatků z termodynamiky potřebných pro další úvahy. Přiznám se, že se mi tento text četl velice obtížně. Vyskytuje se zde mnoho z literatury převzatých vztahů bez podrobnějšího odvození a text je napsán příliš kompaktně, místy až na hranici srozumitelnosti. Musel jsem si při čtení práce řadu věcí pracně odvodit i dohledat. Nechci však, aby to vyznělo jako výtky směrem k doktorandovi, zřejmě to nešlo udělat jinak z důvodu omezeného rozsahu celé práce.

Za hlavní přínos této práce považuji jednak úspěšnou softwarovou implementaci reálné stavové rovnice páry IAPWS-95 pro metastabilní oblast, a dále pak dosažené numerické výsledky, které vykazují kvalitativně i kvantitativně dobrou shodu s experimentálními daty dostupnými ze zahraniční literatury. Velice cenné je to, že všechny tyto výsledky byly buď publikovány v prestižních mezinárodních časopisech s IF, anebo podrobeny diskusi před odbornou veřejností na mezinárodních konferencích.

Co se týče formální stránky, práce je napsána dobrou češtinou, ale s mnoha překlepy a několika hrubými gramatickými chybami. Práce je přehledná, dobře strukturovaná a má pěknou grafickou úpravu. Některé obrázky v kapitole 5 jsou bohužel velice malé s nečitelnou škálou. Dovolím si upozornit autora disertační práce na několik nepřesností: ve vztahu (2.57) by mělo být  $k_B$  místo  $k$ , ve vztahu (3.3) v posledním řádku chybí závorka, vztah (3.5) není správně, ve vztazích (3.18) a (3.20) chybí závorky, ve vztahu (3.55) je prostřední člen uveden nesprávně, ve vztahu (3.87) by mělo být  $E_{n+1}$ , pravé strany v rovnicích (3.89) a (3.90) nejsou zapsány správně.

K práci mám následující otázky:

1. Není mi jasné, proč lze člen  $\Delta\mu_1$ , jak podle doktoranda ukazuje tabulka 2.1, zanedbat, viz str. 32 dole. Mohl by mi to doktorand vysvětlit?
2. Když do rovnice (2.35) dosadím za  $n_1 = m_1/M$ , pak  $\Delta\mu_2$  v rovnici (2.36) musí mít jinou jednotku než  $J/mol$ . Nebo se mýlím?
3. Rovněž moc nerozumím vztahu (2.56). Bylo by možné ho nějak okomentovat?
4. Bylo by možné stručně vysvětlit, odkud platí identita (4.47)?
5. Nikde v kapitole 5 jsem se nedočel, na jak kvalitních výpočetních sítích jste prováděl numerické simulace. Byla použita pro Vaše výpočty dostatečně jemná výpočetní síť s ohledem na použitý první řád přesnosti prostorové diskretizace? Prováděl jste analýzu vlivu kvality výpočetní sítě na numerické výsledky? Nestálo by za to zvážit implementaci nějaké vhodné metody vyššího řádu přesnosti?
6. Domnívám se, že i vazkost proudícího média bude mít nezanedbatelný vliv na kvalitu výsledků. Uvažujete o rozšíření matematického modelu o vazké toky? Jaké obtíže s tím budou spojeny?

**Závěr:**

**Doktorand Ing. Vladimír Hric jednoznačně prokázal, že má nejen výborné teoretické znalosti z termodynamiky, mechaniky tekutin a numerické matematiky, ale že rovněž dokáže samostatně a efektivně aplikovat moderní výpočtové metody dynamiky tekutin pro řešení velice složitých problémů dvoufázového proudění, konkrétně směsi páry a rozptýlených kapek, vyskytujících se v dýzách či parních turbínách. Po odborné**

**stránce se jedná o velmi kvalitní disertační práci, která splňuje všechny požadavky kladené na kvalifikační práce tohoto druhu. Disertační práce, vyvinuté algoritmy i dosažené původní výsledky jsou bezesporu přínosem pro obor numerického modelování proudění tekutin. Předloženou disertační práci bez sebemenších pochyb doporučuji k obhajobě. V případě její úspěšné obhajoby jednoznačně doporučuji udělit doktorandovi titul Ph.D. ve smyslu příslušného zákona.**

V Plzni dne 28. ledna 2022

doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.

Katedra mechaniky,  
Fakulta aplikovaných věd,  
ZČU v Plzni,  
Technická 8, 301 00 Plzeň