

Oponentní posudek dizertační práce

Uchazeč: Ing. Pavla Šabacká

Název dizertační práce: Výzkum nadzvukového proudění na pomezí mechaniky kontinua

Oponent: doc. Ing. Petr Koňas, Ph.D.

Pracoviště opONENTA: SVS FEM s.r.o, Trnkova 3104/117c, 628 00 Brno

Oponent se v posudku vyjádří dle Studijního a zkušebního řádu VUT zejména:

- a) k aktuálnosti tématu dizertační práce,*
 - b) zda dizertační práce splnila stanovený cíl,*
 - c) k postupu řešení problému a k výsledkům dizertační práce s uvedením konkrétního přínosu doktoranda,*
 - d) k významu pro praxi nebo rozvoj oboru,*
 - e) k formální úpravě dizertační práce a její jazykové úrovni,*
 - f) zda dizertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona,*
 - g) zda student prokázal nebo neprokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a zda práce splňuje nebo nesplňuje požadavky standardně kladené na dizertační práce v daném oboru. Bez tohoto závěru je posudek neplatný.*
- Ke každému z níže uvedených bodů je nutno doplnit stručný komentář.*

Ad a) Aktuálnost tématu dizertační práce

Téma dizertační práce je velmi aktuální.

Komentář: Téma nadzvukového proudění v nízkotlakých podmínkách je vysoce aktuální ve vztahu k moderním pokrokům v mechanice kontinua a jejich aplikacích v elektronové mikroskopii. Řešení výzev spojených s řízením proudění v diferenciálně čerpaných komorách odpovídá naléhavým technologickým potřebám, zejména při zlepšování výkonu a rozlišení EREM. Zaměření na optimalizaci tvaru dýzy za účelem snížení rozptylu elektronového svazku, jak je popsáno v **sekci 6.8**, je jasným příkladem praktického přínosu vycházejícího z výsledků této studie.

Na druhé straně práce předpokládá, že závěry z idealizovaných experimentálních a výpočetních nastavení mohou být přímo přeneseny na provozní systémy EREM. Tento předpoklad považuji v této fázi za odvážný, zejména v závěrech **sekce 6.7**, kde se tvrdí, že optimalizované návrhy dýz mohou významně snížit rozptyl

svazku. Simulace sice nabízejí cenné poznatky, ale absence detailní a hlubší validace může vést ještě k mnoha překvapením, která budou minimálně překážkou pro přímé nasazení.

Ad b) Splnění stanoveného cíle dizertační práce

Cíl dizertační práce byl splněn.

Komentář: Dizertační práce stanovuje několik jasně definovaných cílů, které jsou uvedeny v **kapitole 4 (Cíle a metodika práce)**. Mezi hlavní cíle patří:

1. Návrh a výroba experimentální komory pro studium nadzvukového proudění v nízkotlakých podmínkách.
2. Vývoj a ladění matematicko-fyzikálních modelů využívajících Ansys Fluent a další nástroje pro simulaci proudění.
3. Analýza vlivu drsnosti povrchu dýzy na chování proudění.
4. Validace teoretických a výpočetních modelů pomocí experimentálních dat.
5. Identifikace praktických aplikací výsledků, zejména optimalizace geometrie dýzy pro zlepšení výkonu diferenciálně čerpaných komor EREM.

Každý z těchto cílů je systematicky řešen, přičemž práce nabízí podrobné podklady a výstupy podporující jejich naplnění. Co se týče podrobnějšího rozboru:

Návrh a výroba experimentální komory

První cíl, návrh experimentální komory, je splněn ve velmi vysoké kvalitě. V **kapitole 3** je podrobně popsán proces návrhu, od počátečních úvah založených na teorii jednorozměrného izoentropického proudění po konstrukci trojrozměrného objemového modelu.

Výroba experimentální komory, popsaná v **sekci 3.5**, zahrnuje ověření fyzických rozměrů proti původní technické dokumentaci. Změny rozměrů byly minimalizovány a zůstaly v mezích tolerancí, což svědčí o

důsledné realizaci tohoto cíle. Tento proces byl navíc úspěšně propojen s následnými experimentálními měřeními.

Tento cíl považuji za splněný, avšak některé oblasti, jako například optimalizace geometrie komory pro snadnější přístupnost měřících bodů by mohly být diskutovány podrobněji. To by mohlo usnadnit replikaci a rozšíření experimentů.

Vývoj a ladění matematicko-fyzikálních modelů

Druhý cíl, vývoj a ladění matematicko-fyzikálních modelů, je v práci realizován s pomocí aplikace Ansys Fluent, který je klíčovým nástrojem pro simulaci proudění v různých podmínkách. **Kapitola 5** detailně popisuje teoretické podklady používané při vytváření modelů, včetně izoentropického jednorozměrného proudění (**sekce 5.3**) a vlivu transportních jevů v plynech (**sekce 5.4**).

Autorka systematicky zlepšuje modely na základě experimentálních dat získaných z komory. Jako příklad lze uvést **sekcí 6.2** jsou výsledky experimentálního měření tlaku porovnávány s hodnotami z CFD simulací. Tento proces iterace pomáhá identifikovat chyby a ladit parametry, což je příslibem pro zvýšení přesnosti modelů.

I když tento cíl byl splněn, jisté metodologické mezery vyvolávají otázky o přesnosti výsledků. Například v **sekcí 5.5.1** chybí podrobný popis strategie zjemnění sítě a výběru numerického řešiče, což jsou klíčové faktory při simulaci extrémních tlakových gradientů. Tyto detaily by mohly být důležité při validaci robustnosti modelů.

Analýza vlivu drsnosti povrchu

Třetí cíl, analýza vlivu drsnosti povrchu dýzy, je řešen prostřednictvím kombinace experimentálních a simulačních dat. **Kapitoly 6.3 až 6.8** detailně popisují, jak různé hodnoty drsnosti ovlivňují proudění, včetně Machova čísla, rozložení tlaku a charakteristik rázových vln.

Přestože výsledky simulací přinášejí zajímavé poznatky, skutečné fyzikální testování vlivu drsnosti je omezené. Autor se opírá převážně o simulace v Ansys Fluent, což může být problematické, protože simulace nemusí plně zohlednit nelineární efekty nebo přechodové režimy. Na druhou stranu alternativní experimentální validace je velmi komplikovaná finančně nákladná, takže je zvolený přístup více než pochopitelný.

Tento cíl je zcela jistě splněn na teoretické úrovni, ale větší důraz na budoucí experimentální validaci by práci prospěl.

Validace modelů pomocí experimentálních dat

Čtvrtý cíl je klíčovou součástí práce a je realizován pomocí měření tlaků a teplot na povrchu dýzy, v ose proudění a na stěnách komory. Data jsou následně porovnávána se simulacemi, jak je vidět v **tabulce 6.4**, která ukazuje porovnání tlakových hodnot získaných z experimentálního měření a simulací.

Autorovi se daří dosáhnout dobré shody mezi experimentálními a simulačními výsledky, zejména v nízkotlakových oblastech. Nicméně, jisté odchylky, jak je zdůrazněno v **sekci 6.5**, naznačují, že modely nemusí být plně přesné pro všechny varianty drsnosti povrchu.

Validace je důkladná, ale zahrnutí dodatečných experimentálních proměnných, jako jsou rychlost proudění nebo vliv teplotních gradientů, by mohlo práci ještě posílit.

Identifikace praktických aplikací

Poslední cíl, zaměřený na aplikace, se soustředí na optimalizaci geometrie dýz v EREM. Autor navrhuje praktická vylepšení, která by mohla snížit rozptyl elektronového svazku, a tím zlepšit kvalitu obrazu. Tyto návrhy jsou podloženy simulačními výsledky.

Nicméně praktická realizace těchto návrhů není v práci plně testována, což omezuje přímý dopad výsledků na průmyslovou praxi. Přesvědčivější by bylo, kdyby autorka zahrнула i zkoušky těchto návrhů v provozních podmínkách EREM, ale je pochopitelné proč zvolila tuto cestu, takže tuto připomínku uvádím pro forma jako námět pro budoucí výzkum.

Tento cíl je splněn na teoretické úrovni, ale bez experimentální validace zůstává jeho aplikovatelnost otevřená.

Shrnutí plnění cílů

Autorka systematicky řeší cíle, které si stanovila, a práce přináší významné teoretické i praktické poznatky. Přestože některé cíle, zejména ty spojené s praktickými aplikacemi, zůstávají na teoretické úrovni, celkový rozsah a hloubka práce je obdivuhodná. Důslednější zaměření na experimentální validaci a robustnost numerických modelů by však zvýšilo důvěryhodnost a praktický dopad závěrů.

Ad c) Postup řešení problému a výsledky disertační práce s uvedením konkrétního přínosu doktoranda

Postup řešení problému a výsledky disertační práce jsou nadprůměrné.

Komentář: Metodický přístup, kombinující teoretickou analýzu, CFD simulace s využitím Ansys Fluent a experimentální validaci, patří k silným stránkám práce. Převzání a aplikace výsledků Monte Carlo simulací Dr. Danilatoše k validaci výsledků CFD, jak je popsáno v **sekcí 2.2**, je zvláště pozoruhodné a zvyšuje věrohodnost výsledků. Návrh a výroba vlastní experimentální komory, detailně popsané v **kapitole 3**, dále podtrhují inovativní přístupy v této práci.

Nicméně práce by mohla diskutovat i limity použitých nástrojů. Například Ansys Fluent, přestože je výkonným nástrojem, nemusí plně zachytit přechodové režimy proudění poblíž hranice kontinua, zejména při extrémních tlakových gradientech. Nedostatek diskuse o citlivosti numerických řešičů a strategií zjemnění sítě v **sekcí 5.5.1** vyvolává pak otázky o robustnosti simulací. Rovněž vliv okrajových podmínek, například teplot stěn, by si zasloužil další zkoumání.

Ad d) Význam pro praxi nebo rozvoj oboru

Význam pro praxi nebo rozvoj oboru je nadprůměrný.

Komentář: Výzkum přináší významné příspěvky jak teoretické, tak praktické. Teoretické poznatky o dynamice rázových vln a vlivu drsnosti povrchu na chování proudění, obohacují porozumění nadzvukovým prouděním v nízkotlakých prostředích. Tyto poznatky mají hodnotu pro širší oblast mechaniky kontinua.

Z praktického hlediska nabízí studie doporučení pro optimalizaci geometrie dýz ke zlepšení výkonu EREM. Navržené konstrukce mají za cíl minimalizovat rozptyl elektronového svazku, v závislosti na charakteristikách proudění pro různé konfigurace dýz. Praktické přínosy však mohou být nadhodnocené a závisí na předpokladu, že idealizované podmínky v simulacích a experimentech lze replikovat v provozních systémech.

Ad e) Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Formální úprava dizertační práce a její jazyková úroveň je vynikající.

Komentář: Práce je dobře strukturovaná a logicky uspořádaná, čtenáře provádí od teoretických základů přes experimentální validaci až po praktické aplikace. Jazyková úroveň je precizní a použití odborné terminologie je vhodné pro cílovou odbornou komunitu. Nicméně některé obrázky a popisy, zejména v **kapitole 6**, týkající se zhodnocení výsledků, jsou občas nepřehledné a prospělo by jim přeformátování do stylu klasických formátů běžných pro vydavatelské domy. Typicky jsou to grafy z excelu např. **obrázek 6.5**, kde schodovitý průběh ukazuje spíše na problém se škálou přiblížení, než skutečný průběh, který by měl být spojitý.

Použití podrobných rovnic a odvození v **kapitole 5** považuji za odpovídající. Přesto bych uvítal širší diskuzi o vlivu turbulence zejména s přihlédnutím k výrazné drsnosti na stěnách uvažované v modelech. Na druhou stranu je prezentace experimentálních dat, jako je tomu např. u **obrázku 6.8**, kde je porovnáváno rozložení tlaku v dýze s oblastí zasažené mezní vrstvy, velmi jasná a podtrhuje schopnost autora efektivně komunikovat komplexní výsledky.

Ad f) Dizertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona

Dizertační práce podmínky uvedené v § 47 odst. 4*) zákona č. 111/1998 sb. o vysokých školách splňuje.

*(*4) Studium se řádně ukončuje státní doktorskou zkouškou a obhajobou dizertační práce, kterými se prokazuje schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu nebo vývoje nebo k samostatné teoretické a tvůrčí umělecké činnosti. Dizertační práce musí obsahovat původní a uveřejněné výsledky nebo výsledky přijaté k uveřejnění.*

Ad g) Prokázání tvůrčí schopnosti studenta v dané oblasti výzkumu a zda práce splňuje nebo nesplňuje požadavky standardně kladené na dizertační práce v daném oboru.

Doktorand prokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a práce splňuje požadavky standardně kladené na dizertační práce v daném oboru.

Komentář: Originalita dizertační práce a tvůrčí schopnost studenta spočívá v multidisciplinárním přístupu a inovativní integraci experimentálních a výpočetních technik. Návrh experimentální komory, popsany v **sekci**

3.1, je obzvláště inspirativní a poskytuje jedinečnou platformu pro studium nízkotlakých nadzvukových proudění.

Celkové hodnocení: Dizertační práce je chvályhodným dílem, které řeší náročné a aktuální téma s vědeckou důsledností a inovací. Přestože přináší významné teoretické a metodologické příspěvky, určité předpoklady a omezení snižují jistotu jejího praktického dopadu. Což ale není výtka autora, ale je to zejména zdůraznění pokračování výzkumu v této oblasti, která stále nabízí více otázek než odpovědí. Bez nejmenších pochyb mohu konstatovat, že touto prací jsou dle mého názoru naplněny všechny zákonné podmínky a doporučuji, aby práce byla přijata k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu k udělení Ing. Pavle Šabacké akademický titul Doktor (Ph.D.)

Otázky oponenta:

1. Jaký vliv mají teplotní gradienty na studované dynamiky proudění a jak by mohly být lépe zahrnuty do budoucích simulací?
2. Jaká konkrétní opatření byla přijata k zajištění robustnosti numerických řešičů a strategii zjemnění sítě v Ansys Fluent?
3. Mohly by alternativní modelovací nástroje poskytnout dodatečné poznatky o přechodových režimech proudění poblíž hranice kontinua?

Dizertační práci k obhajobě doporučuji nedoporučuji.

Dne: 21.11.2024

Podpis: 