

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní
DRTA sondy pomocí numerických simulací

MASTER THESIS

Improvement of thermodynamic properties of a high-speed
DRTA probe by numerical simulations

Autor práce: Bc. Josef Krubner

Vedoucí práce: Ing. Michal Schmirler, Ph.D.

Konzultant: doc. Ing. Jan Halama, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krubner**

Jméno: **Josef**

Osobní číslo: **473541**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**

Studijní program: **Aplikované vědy ve strojním inženýrství**

Specializace: **Matematické modelování v technice**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní DRTA sondy pomocí numerických simulací

Název diplomové práce anglicky:

Improvement of thermodynamic properties of a high-speed DRTA probe by numerical simulations

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište problematiku měření teplot plynů proudících při vysokých podzvukových rychlostech, tedy s uvažováním jejich stlačitelnosti.
- 2) Popište princip fungování v názvu zmiňované DRTA sondy. Představte geometrii sondy, která bude výchozí pro další kroky v rámci návrhu zlepšení jejích termodynamických vlastností.
- 3) Popište CFD model, který budete pro simulaci termodynamických vlastností sondy používat (fyzikální model, okrajové podmínky, numerické schéma, způsoby diskretizace atd.).
- 4) Proveďte simulace vlivu jednotlivých vybraných konstrukčních úprav na termodynamické parametry sondy (hodnoty restitučních faktorů v závislosti na rychlosti nabíhajícího proudu, směrová citlivost, rozložení proudového a teplotního pole atd.).
- 5) Na základě výsledků provedených numerických simulací vyberte nejvhodnější geometrii sondy a vyhodnoťte její termodynamické vlastnosti.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce či konzultanta.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Schmirler, Ph.D. ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Halama, Ph.D. ústav technické matematiky FS

Datum zadání diplomové práce: **25.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní DRTA sondy pomocí numerických simulací“ vypracoval samostatně. Veškerá použitá literatura a podkladové materiály jsou uvedeny v příloženém seznamu literatury.

V Praze, dne

.....
Josef Krubner

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Schmirlerovi, Ph.D., a doc. Ing. Janu Halamovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky, které mi byly nápomocny při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a své přítelkyni za podporu při studiu.

Anotační list

Název práce:	Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní DRTA sondy pomocí numerických simulací
Title:	Improvement of thermodynamic properties of a high-speed DRTA probe by numerical simulations
Autor:	Bc. Josef Krubner
Studijní program:	Aplikované vědy ve strojním inženýrství
Druh práce:	Diplomová
Vedoucí práce	Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
Konzultant	doc. Ing. Jan Halama, Ph.D.
Abstrakt:	TODO
Abstract:	TODO
Klíčová slova:	návrh sondy pro měření rychlosti, měření rychlosti plynů, podzvukové proudění, restituční faktor, rovnovážná teplota, CFD simulace
Keywords:	velocimetry probe design, gas velocimetry, subsonic flow, recovery factor, recovery temperature, CFD simulation

Obsah

Seznam použitých symbolů	7
Seznam symbolů a indexů	7
Seznam použitých indexů	7
Seznam obrázků	8
Úvod	9
Závěr	10

Seznam použitých symbolů

Seznam symbolů

a	$\frac{m}{s}$	Rychlost zvuku
c_p	$\frac{J}{kgK}$	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
f	1	Restituční faktor
h	$\frac{J}{kg}$	Měrná entalpie
k	$\frac{m^2}{s^2}$	Turbulentní kinetická energie
Ma	1	Machovo číslo
p	Pa	Tlak
Pr	1	Prandtlovo číslo
r	$\frac{J}{kgK}$	Měrná plynová konstanta
Re	1	Reynoldsovo číslo
T	K	Termodynamická teplota
T_r	K	Rovnovážná teplota
u	$\frac{m}{s}$	Rychlost proudění
ε	1	Chyba
κ	1	Poissonova konstanta
μ	$Pa.s$	Dynamická viskozita
ν	$\frac{m^2}{s}$	Kinematická viskozita
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Hustota
ω	$\frac{1}{s}$	Specifická rychlost disipace

Seznam indexů

A	Čidlo A
B	Čidlo B
0	Stagnační

Seznam obrázků

Úvod

Měření parametrů proudění plynů je běžnou součástí průmyslových či výzkumných procesů a konkrétně stanovení rychlosti je samo o sobě velice širokou vědní disciplínou, k níž lze přistupovat mnoha způsoby v závislosti na charakteru proudění a proudícího média, či na povaze měřené rychlosti – v praxi se lze setkat s měřením okamžité rychlosti, rychlostních profilů, či celých $2D/3D$ rychlostních polí pomocí optických metod.

Tato práce je zaměřena na vývoj anemometrické sondy využívající dvojici odporových teplotních snímačů, která je určena pro oblast vysokých podzvukových rychlostí. Jedná se o poměrně neprobádaný pohled na tuto problematiku, který by mohl konkurovat v praxi již ověřeným metodám, mezi které patří například Prandtlova sonda.

Hlavním cílem práce bylo zlepšení termodynamických vlastností sondy prostřednictvím vybraných konstrukčních úprav. Vliv dílčích změn geometrie byl zkoumán s využitím numerických simulací v prostředí software Ansys Fluent. Tento přístup byl zvolen s ohledem na předpokládáné vysoké množství zkoumaných konstrukčních úprav, což by jinak bylo při experimentálním testování problematické jak časově, tak i s ohledem na nutnost výroby jednotlivých prototypů.

Práce je členěna na celkem pět kapitol. První obsahuje úvod do metodiky měření teplot při vysokých podzvukových rychlostech. S ohledem na zkoumanou problematiku je zaměřena hlavně na využití teplotních snímačů. Druhá kapitola popisuje princip fungování zkoumané DRTA sondy a seznamuje čtenáře s výchozí geometrií, se kterou je v dalších kapitolách pracováno. Třetí kapitola představuje použitý výpočetní model včetně uvedení fyzikálních rovnic a popisu výpočetní oblasti a numerického řešiče. Jejím cílem je umožnit v budoucnu realizaci dalších simulací konstrukčních úprav za stejných podmínek, za jakých byly prováděny v této práci. Čtvrtá, nejrozsáhlejší, kapitola se zabývá analýzou a zhodnocením vlivu dílčích konstrukčních úprav modelu sondy na jeho termodynamické vlastnosti. V páté kapitole je představen finální návrh modelu DRTA sondy spolu s analýzou termodynamických vlastností.

Závěr

V rámci práce byla navržena nová geometrie DRTA sondy, která slouží k měření vysokých podzvukových rychlostí. Návrhu předcházela numerická analýza vlivu dílčích konstrukčních úprav na termodynamické vlastnosti sondy, konkrétně na restituční faktory jejich teplotních čidel.

První kapitola byla věnována problematice dynamického ohřevu spojeného s měřením teplot při vysokých podzvukových rychlostech. Byl zde popsán restituční faktor a s ním spojená rovnovážná teplota. S využitím těchto znalostí byl představen způsob určení stagnační teploty pomocí teplotních snímačů a dále bylo popsáno nepřímé měření statické teploty.

Ve druhé kapitole byl představen princip metody DRTA pro měření vysokých podzvukových rychlostí a byla popsána výchozí konstrukce prototypu sondy. V závěru kapitoly byly uvedeny cíle numerických simulací.

Cílem třetí kapitoly byl popis použitého výpočetního modelu. Byly představeny příslušné fyzikální rovnice a model turbulence. Následoval popis výpočetní geometrie a použitých materiálů, následovaný představením aplikovaných okrajových podmínek. Zbývající část této kapitoly byla věnována přípravě výpočtu – byl zde popsán postup tvorby výpočetní sítě a nastavení výpočtu.

Čtvrtá kapitola se věnovala analýze dílčích konstrukčních úprav, kterým předcházela studie vlivu jemnosti sítě na výsledky výpočtu, na základě čehož bylo zvoleno nastavení parametrů povrchové sítě, které bylo dále aplikováno ve všech dalších simulacích.

V poslední kapitole byla navržena nová konstrukce DRTA sondy. Vedle změn rozměrů a rozložení jednotlivých geometrických prvků konstrukce bylo dále přidáno stínění k čidlu B. Následně byla tato upravená geometrie zkoumána obdobně, jako dílčí konstrukční úpravy. Bylo zkoumáno chování restitučních faktorů při změně rychlosti proudění a při změně natočení sondy. Dále bylo simulováno chování pro různé materiály sondy. Zde se ukázal jako nejvhodější polykarbonát, zejména díky své nízké tepelné vodivosti.

Úprava geometrie měla největší přínos ohledně směrové necitlivosti sondy. Toho bylo dosaženo především díky přidanému stínění u čidla B. Zlepšení bylo patrné také při změně rychlosti proudění, kdy došlo k částečnému vyrovnání průběhu rozdílu restitučních faktorů sondy.

Jmenovitá hodnota rozdílu restitučních faktorů byla stanovena jako 0.1232, což odpovídá rychlosti proudění $250 \frac{m}{s}$. Chyba měření rychlosti při uvažování této hodnoty se ukázala ve většině případů (s výjimkou velkých natočení v rovině symetrie sondy a rychlostí překračujících $300 \frac{m}{s}$) menší, než 2.5 %.

Výstupy této práce by bylo vhodné experimentálně ověřit – dalšími navazujícími kroky by tak mohla být výroba prototypu upravené DRTA sondy a její následné testování.