

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, restituční teplota, CFD simulace
Keywords:	velocimetry probe design, gas velocimetry, subsonic flow, recovery factor, recovery temperature, CFD simulation

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	7
Seznam symbolů	7
Seznam zkratek	7
Seznam použitých indexů	8
Seznam obrázků	8
Úvod	9
1 Měření teplot při vysokých podzvukových rychlostech	10
1.0.1 Dynamický ohřev	10
1.0.2 Restituční faktor	10
1.1 Dynamická teplota	10
1.2 Měření klidové teploty	10
1.3 Měření statické teploty	10
2 DRTA sonda	11
2.1 Princip fungování	11
2.2 Výchozí geometrie	12
2.3 Cíle numerických simulací	13

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam symbolů

a	ms^{-1}	Rychlost zvuku
c_p	$Jkg^{-1}K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
E	1	Korekční koeficient
h	Jkg^{-1}	Měrná entalpie
I	1	Intenzita turbulence
K	1	Korekční součinitel
κ	1	Poissonova konstanta
Ma	1	Machovo číslo
μ	$Pa\cdot s$	Dynamická viskozita
ν	m^2s^{-1}	Kinematická viskozita
p_c	Pa	Celkový tlak
Pr	1	Prandtlovo číslo
p_s	Pa	Statický tlak
q	Jkg^{-1}	Měrné teplo
q_{dyn}	Pa	Dynamický tlak
q_{kin}	Pa	Kinetický tlak
r	$Jkg^{-1}K^{-1}$	Měrná plynová konstanta
r/r^*	1	Recovery faktor
Re	1	Reynoldsovo číslo
ρ	kgm^{-3}	Hustota
T	K	Termodynamická teplota
T_{kal}	K	Teplota podle kalibračního polynomu
T_r	K	Recovery teplota
u	ms^{-1}	Rychlost proudění
U	V	Elektrické napětí

Seznam zkratek

CCD	Charge-Coupled Device
EFV	Elastic Filament Velocimetry
Holo-PIV	Holographic Particle Image Velocimetry
HWA	Hot Wire Anemometry
ICCD	Intensified Charge-Coupled Device
LDD	Laser Doppler Detection
LPT	Lagrangian Particle Tracking
OTV	Ozone Tagging Velocimetry
PIV	Particle Image Velocimetry
Scan-PIV	Scanning Particle Image Velocimetry
Tomo-PIV	Tomographic Particle Image Velocimetry

Seznam indexů

A	Sonda A
B	Sonda B
i	Stupeň iterace
∞	Nabíhající proud vzduchu
0	Stagnační
1	Před dýzou
2	Za dýzou

Seznam obrázků

2.2.1 Výchozí geometrie DRTA sondy.	12
---	----

Úvod

Problematika měření rychlosti proudění tekutin je velice rozsáhlým vědním oborem a můžeme zde nalézt mnoho postupů a metodik, které se postupně vyvíjejí.

1 Měření teplot při vysokých podzvukových rychlostech

1.0.1 Dynamický ohřev

1.0.2 Restituční faktor

1.1 Dynamická teplota

1.2 Měření klidové teploty

1.3 Měření statické teploty

2 DRTA sonda

2.1 Princip fungování

Myšlenka stojící za DRTA sondou se opírá právě o měření rovnovážných teplot (viz předchozí Kapitola 1). Budeme-li uvažovat teplotní čidlo s restitučním faktorem f_A , pak bude měřená teplota T_{rA} dána následovně:

$$T_{rA} = T + f_A \frac{u^2}{2c_p} \quad (2.1.1)$$

Jednoduchou úpravou lze odvodit vztah pro určení rychlosti proudění:

$$u = \sqrt{2c_p \frac{T_{rA} - T}{f_A}} \quad (2.1.2)$$

Takový postup by však vyžadoval znalost statické teploty nabíhajícího proudu T , nebo potažmo teploty klidové T_0 – tuto metodiku lze najít v řadě aplikací (viz metoda RTA – *Recovery Temperature Anemometry* [Ishibashi2004, Ishibashi2012]). Zde byl k měření použit termočlánek s restitučním faktorem uvažovaným jako \sqrt{Pr} a výsledná rychlost proudění byla stanovena ze vztahu:

$$u = \sqrt{\frac{2\kappa r}{\kappa - 1} \frac{T_0 - T_{rA}}{f_A}} \quad (2.1.3)$$

Nevýhodou výše uvedené RTA metody je právě nutnost měření dalších parametrů proudění (T , T_0), což značně omezuje možnosti jejího využití. Klíčovým krokem v návrhu DRTA sondy je proto eliminace statické teploty ze Vztahu 2.1.2. Toho lze docílit použitím odlišného teplotního čidla – odlišnost je zde reprezentovaná rozdílným restitučním faktorem, který označme f_B . Toto čidlo bude tedy indikovat teplotu T_{rB} :

$$T_{rB} = T + f_B \frac{u^2}{2c_p} \quad (2.1.4)$$

Rychlost proudění lze následně určit z rozdílu Vztahů 2.1.1 a 2.1.4:

$$\begin{aligned} T_{rA} - T_{rB} &= (f_A - f_B) \frac{u^2}{2c_p} \\ u &= \sqrt{\frac{2c_p (T_{rA} - T_{rB})}{(f_A - f_B)}} \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

Výhoda použití dvou teplotních snímačů s rozdílnými restitučními faktory spočívá navíc v tom, že lze obdobně odvodit i vztahy pro určení Machova čísla a statické teploty nabíhajícího proudu. Pro určení Ma je třeba nejprve upravit Vztahy 2.1.1 a 2.1.4:

$$\begin{aligned} T_{rA} &= T + f_A \frac{u^2}{2c_p} \frac{a^2}{a^2} = T \left(1 + f_A \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right) \\ T_{rB} &= T \left(1 + f_B \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right) \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

Výsledný vztah pro Ma vznikne z podílu měřených teplot:

$$\frac{T_{rA}}{T_{rB}} = \frac{1 + f_A \frac{\kappa-1}{2} Ma^2}{1 + f_B \frac{\kappa-1}{2} Ma^2}$$

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \frac{T_{rA} - T_{rB}}{T_{rB} f_A - T_{rA} f_B}} \quad (2.1.7)$$

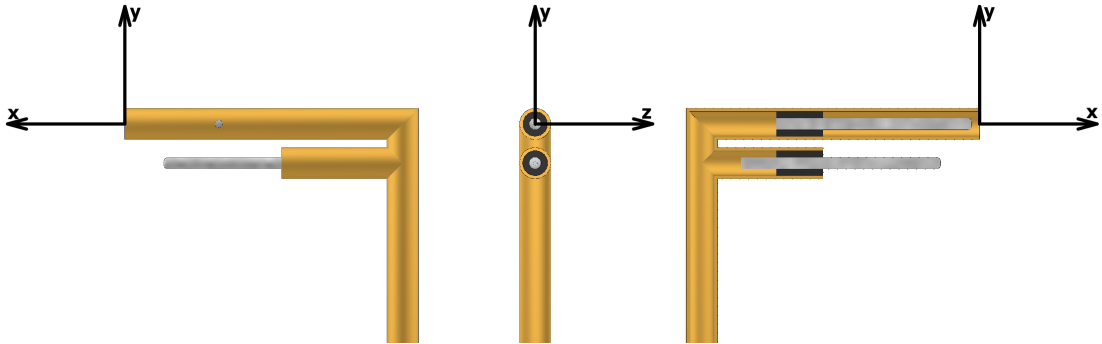
Určení statické teploty lze odvodit pomocí eliminace rychlosti proudění ze Vztahů 2.1.1 a 2.1.4:

$$\frac{u^2}{2c_p} = \frac{T_{rA} - T}{f_A} = \frac{T_{rB} - T}{f_B}$$

$$T = \frac{T_{rB} f_A - T_{rA} f_B}{f_A - f_B} \quad (2.1.8)$$

2.2 Výchozí geometrie

Jak již vyplývá z principu fungování DRTA sondy, klíčovými prvky konstrukce jsou dvě teplotní čidla. V tomto případě byly zvoleny odporové teplotní snímače Pt100 (model *1PT100K2515* značky Omega Engineering) o průměru 1.5 mm a délce 25 mm . Ty jsou uchyceny pomocí těsnění v mosazné trubici o vnějším průměru 4 mm a tloušťce stěny 0.4 mm . Výchozí geometrie sondy je patrná z Obrázku 2.2.1, detailní rozměry jsou poté uvedeny v Příloze ??.



Obrázek 2.2.1: Výchozí geometrie DRTA sondy.

Klíčový je zde rozdíl restitučních faktorů teplotních čidel. To je zajištěno opláštěním jednoho z nich – bude značeno jako čidlo A. Při proudění plynu stínící trubicí dochází k jeho výraznému zpomalení, což vede k nárůstu statické teploty a čidlo se tak zahřívá více, než kdyby bylo umístěné volně v proudu. Stínění je opatřeno dvěma ventilačními otvory o průměru 1 mm , které zajišťují proudění vzduchu trubicí. Konstrukce čidla A se tak podobá měření stagnační teploty (viz Kapitola 1), kdy je cílem se co nejvíce přiblížit stavu $f_A \rightarrow 1$.

2.3 Cíle numerických simulací

Hlavním cílem CFD simulací byla úprava geometrie sondy tak, aby byla zajištěna její co největší použitelnost nezávisle na rychlosti proudění, ani na jeho směru (zde lze hovořit o limitním natočení sondy, kdy bude ještě chyba měření přijatelná). Dalším cílem bylo dále dosažení co nejvyššího rozdílu restitučních faktorů s ohledem na další zvolené úpravy geometrie.

Charakter konstrukčních úprav se odvíjel také od snahy zachovat původní koncept sondy a měl umožnit pozdější snadnou konstrukci nového modelu pro experimentální testování.