

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