

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 | 8 |
| Seznam symbolů | 8 |
| Seznam zkratek | 8 |
| Seznam použitých indexů | 9 |
| Seznam obrázků | 9 |
| Úvod | 10 |
| 1 Měření teplot při vysokých podzvukových rychlostech | 11 |
| 1.0.1 Dynamický ohřev | 11 |
| 1.0.2 Restituční faktor | 11 |
| 1.1 Dynamická teplota | 11 |
| 2 DRTA sonda | 12 |
| 2.1 Princip fungování | 12 |
| 2.2 Výchozí geometrie | 12 |
| 2.3 Cíle numerických simulací | 12 |
| 3 CFD model | 14 |
| 3.1 Základní systém rovnic | 14 |
| 3.1.1 Rovnice kontinuity | 14 |
| 3.1.2 Pohybová rovnice | 14 |
| 3.1.3 Energetická rovnice | 14 |
| 3.1.4 Konstitutivní vztahy | 14 |
| 3.2 Model turbulence | 16 |
| 3.3 Výpočetní geometrie | 18 |
| 3.3.1 Výpočetní oblast | 18 |
| 3.3.2 Využití symetrie | 19 |
| 3.3.3 Materiály | 20 |
| 3.4 Okrajové podmínky | 21 |
| 3.4.1 Hranice výpočetní oblasti | 21 |
| 3.4.2 Stěny | 21 |
| 3.5 Výpočetní síť | 22 |
| 3.5.1 Povrchová síť | 22 |
| 3.5.2 Zjemnění v mezní vrstvě | 22 |
| 3.5.3 Objemová síť | 23 |
| 3.6 Numerický řešič | 24 |
| 3.6.1 Odhad gradientu | 24 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.6.2 | Aproximace hodnot na stěnách | 25 |
| 3.6.3 | Numerické schéma | 26 |
| 3.6.4 | Inicializace výpočtu | 26 |
| 3.6.5 | Určení restitučních faktorů | 26 |

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. | 13 |
| 3.3.1 Výpočetní oblast s vyznačením souřadného systému a polohy měřených geometrií. | 18 |
| 3.3.2 Výpočetní oblast pro řešení symetrických úloh. | 19 |
| 3.4.1 Části hranice pro aplikování okrajových podmínek (v jednotlivých ob- rázcích označeny žlutou barvou). | 21 |
| 3.5.1 Graf četností hodnot bezrozměrné vzdálenosti od stěny čidla A pro úlohu z Kapitoly ?? . Průměrná hodnota byla pro tento případ rovna 0.945. . . | 23 |
| 3.5.2 Pohled na výpočetní síť z Kapitoly ?? ze strany symetrie. | 24 |
| 3.6.1 Schéma pro určení gradientu pomocí metody nejmenších čtverců. . . . | 25 |
| 3.6.2 Schéma s vyznačením oblasti odečtu teploty pro určení restitučního fak- toru. | 26 |

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

2 DRTA sonda

2.1 Princip fungování

Princip měření rychlosti pomocí DRTA sondy (DRTA = „*Double Recovery Temperature Anemometry*“) spočívá ve využití dvou teplotních čidel, v tomto návrhu bylo pracováno s odporovými teplotními snímači Pt100. Komplikaci při použití jediného snímače pro určení rychlosti proudění představuje nutná znalost statické teploty. Ta lze jednoduše eliminovat přidáním druhého snímače s rozdílným restitučním faktorem:

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

$$T_{rB} = T + f_B \frac{u^2}{2c_p} \quad (2.1.2)$$

$$T_{rA} - T_{rB} = (f_A - f_B) \frac{u^2}{2c_p} \quad (2.1.3)$$

$$u = \sqrt{\frac{2c_p (T_{rA} - T_{rB})}{(f_A - f_B)}} \quad (2.1.4)$$

kde indexy A , respektive B odpovídají jednotlivým čidlům. Podobným způsobem lze sestavit vztah pro určení Machova čísla:

$$T_{rA} = T + f_A \frac{u^2}{2c_p} \frac{a^2}{a^2} = T \left(1 + f_A \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right) \quad (2.1.5)$$

$$T_{rB} = T \left(1 + f_B \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right) \quad (2.1.6)$$

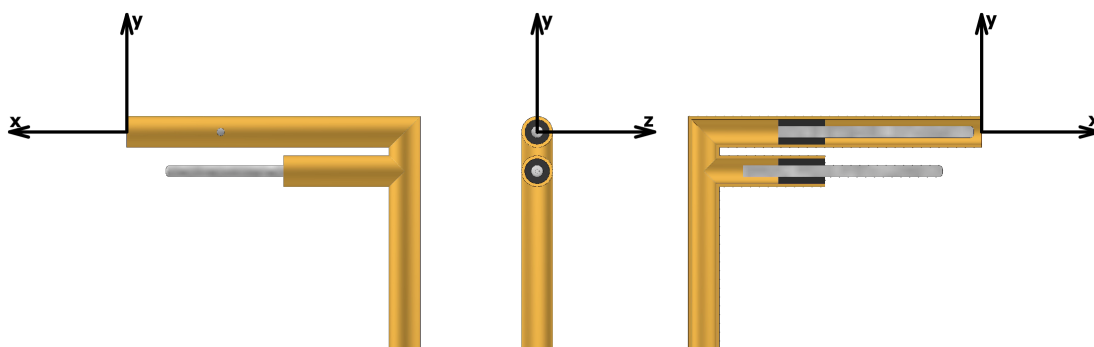
$$\frac{T_{rA}}{T_{rB}} = \frac{1 + f_A \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2}{1 + f_B \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2} \quad (2.1.7)$$

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \frac{T_{rA} - T_{rB}}{T_{rB} f_A - T_{rA} f_B}} \quad (2.1.8)$$

2.2 Výchozí geometrie

Zkoumaná sonda se skládá z dvou odporových teplotních čidel Pt100 (model *1PT100K2515*) o průměru $1.5 [mm]$ a délce $25 [mm]$. Ty jsou umístěny rovnoběžně ve směru proudění pomocí těsnění na jejich koncích, ukotveného v mosazné trubici o průměru $4 mm$ a tloušťce $0.4 mm$, která je využita zároveň k dosažení rozdílu restitučních faktorů jednotlivých čidel. Prostorové uspořádání sestavy je patrné z obrázku 2.2.1. Vyšším restitučním faktorem disponuje čidlo umístěné uvnitř trubice a dále v práci o něm bude hovořeno jako o čidlu A . Proudění stíněním čidla A umožňují dva odvětrávací otvory umístěné $12 mm$ od vstupu do trubice. Čidlo umístěné volně v proudícím médiu vykazuje nižší restituční faktor a bude dále značeno jako čidlo B .

2.3 Cíle numerických simulací



Obrázek 2.2.1: Výchozí geometrie DRTA sondy.