

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 |
| 1.1 Dynamický ohřev | 10 |
| 1.2 Restituční faktor | 11 |

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

| | |
|---|----|
| 1.1.1 Závislost dynamické teploty a poměru $\frac{T}{T_0}$ na Machově čísle proudění pro statickou teplotu 300 K. | 11 |
|---|----|

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

Teplota, jako stavová veličina, je jedním z důležitých parametrů proudění, které jsou sledovány během průmyslových procesů, nebo během provozu strojírenských zařízení, či výzkumných tratí. Její měření je obvykle bezproblémové, hovoříme-li o nízkých rychlostech proudění, nebo případně o kapalinách. Při přechodu do vyšších podzvukových rychlostí plynů (na které je zaměřena tato práce) dochází k nárůstu vlivu jejich stlačitelnosti a určení statické, potažmo stagnační, teploty proudění začíná být problematické. Hranice stlačitelnosti se obvykle uvažuje okolo $Ma = 0.3$.

1.1 Dynamický ohřev

Dobrym ukazatelem míry vlivu stlačitelnosti proudění na měření teploty je poměr statické a stagnační teploty, který lze odvodit z energetické rovnice při uvažování adiabatického výtoku z nádoby o klidových parametrech h_0 , T_0 a $u_0 = 0$ $\frac{m}{s}$ do obecného místa s parametry h , T a u :

$$h_0 = h + \frac{u^2}{2} \quad (1.1.1)$$

$$h = c_p T \quad (1.1.2)$$

$$c_p T_0 = c_p T + \frac{u^2}{2} \quad (1.1.3)$$

$$T_0 = T + \frac{u^2}{2c_p} = T + \frac{u^2}{2c_p} \frac{a^2}{a^2} \quad (1.1.4)$$

$$a = \sqrt{\kappa r T} \quad (1.1.5)$$

$$c_p = \frac{\kappa r}{\kappa - 1} \quad (1.1.6)$$

$$T_0 = T \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \frac{u^2}{a^2} \right) \quad (1.1.7)$$

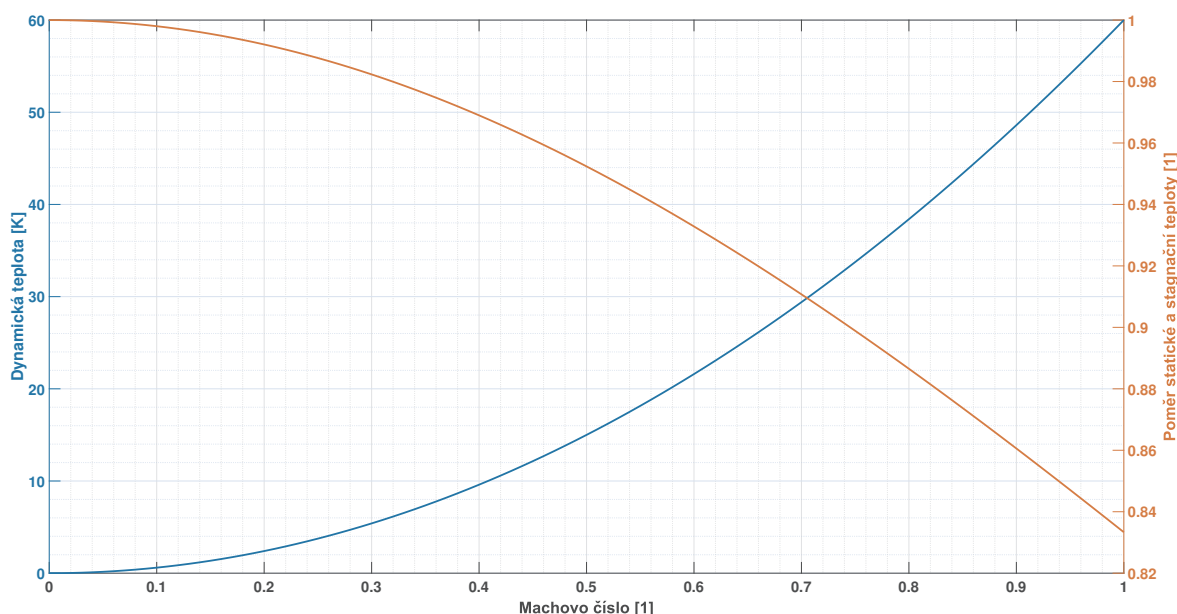
$$Ma = \frac{u}{a} \quad (1.1.8)$$

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2} \quad (1.1.9)$$

kde h $\left[\frac{J}{kg} \right]$ je měrná entalpie, u $\left[\frac{m}{s} \right]$ je rychlost proudění, T $[K]$ je termodynamická teplota, c_p $\left[\frac{J}{kgK} \right]$ je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku, a $\left[\frac{m}{s} \right]$ je rychlost zvuku, κ $[1]$ je Poissonova konstanta, r $\left[\frac{J}{kgK} \right]$ je měrná plynová konstanta a Ma $[1]$ je Machovo číslo. Dolní index 0 označuje stagnační parametry.

Ze Vztahu 1.1.9 je patrné, že při nulové rychlosti proudění ($Ma = 0$) bude statická teplota rovna teplotě stagnační, neboli klidové. Dosažením rychlosti zvuku ($Ma = 1$) klesne poměr na hodnotu $\frac{1}{1 + \frac{\kappa - 1}{2}}$, což pro vzduch odpovídá 0.83 při uvažování $\kappa = 1.4$. Při $Ma = 0.3$ (zmiňovaná mez stlačitelnosti) tvoří v statická teplota 98.2 % stagnační teploty, zanedbáním dynamické teploty bychom se tak dopustili v tomto případě 1.8% chyby. Chybě 2.5 % pak odpovídá Machovo číslo 0.358.

Člen $\frac{u^2}{2c_p}$ v Rovnici 1.1.4 je nazýván dynamická teplota (ačkoliv se o teplotu nejedná) a je projevem stlačitelnosti proudění. Jeho průběh v závislosti na Machově čísle je společně s poměrem $\frac{T}{T_0}$ vyznačen na Obrázku 1.1.1.



Obrázek 1.1.1: Závislost dynamické teploty a poměru $\frac{T}{T_0}$ na Machově čísle proudění pro statickou teplotu 300 K.

1.2 Restituční faktor

Umístěním tělesa do proudu vzduchu dojde k jeho zahřívání vlivem zbrzdění proudění v mezní vrstvě. Budeme-li o tomto tělese dále hovořit jako o teplotním snímači, tak bude klíčové, jakou teplotu naměříme. Ve stagnačním bodě snímače bude plyn dosahovat klidové teploty, mimo něj však bude teplota nižší. Měřená teplota, značená obvykle jako rovnovážná T_r , se tak bude pohybovat mezi teplotou statickou a stagnační ($T < T_r < T_0$). Vztah mezi těmito teplotami popisuje takzvaný restituční faktor f :

$$f = \frac{T_r - T}{T_0 - T} \quad (1.2.1)$$

Restituční faktor je především funkcí Prandtlova čísla, závisí však i na geometrii snímače a na Machově a Reynoldsově čísle [Leontiev2017a]. Jeho hodnota je tedy proměnlivá, nicméně v řadě aplikací jej lze pro definované podmínky považovat za konstantu: pro válcová tělesa umístěná rovnoběžně v proudu vzduchu je při lokálním $Re < 5 \cdot 10^5$ restituční faktor roven \sqrt{Pr} , pro vzduch byla tato hodnota při $Pr = 0.72$ rovna 0.85 [Shapiro1954].