

ANALYSES OF STATIC PRESSURE IN OBLIQUE SHOCKWAVE ON THE PROBE TIP

Jakub JENÁČEK

Mathias Lerch Gymnasium Brno

E-mail: JakubJenacek@seznam.cz

Supervised by: Pavla Šabacká

E-mail: hlavata.pavla@gmail.com

Abstract: This article deals with the debugging analyses of Ansys Fluent for supersonic flow analyzes. It is about analyzes on which the debugging of Ansys Fluent was made for analyzes of supersonic flow circumfluent the tip of the probe compared with the theory of isentropic one-dimensional flow as a basic step for further analyzes in low pressures. The results shown in this paper will further serve as a basis for experimental measuring of given problem.

Keywords: Ansys Fluent, Differentially pumped chamber, Pitot's tube, Shockwave

1 ÚVOD

V současné době je na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT Brno ve spolupráci s UPT AVČR vyrobena experimentální komora, na které budou mimo jiné měřeny rychlostní profily pomocí Pitotových sond, z nichž sonda pro statický tlak je opatřena hrotem, a to z důvodu zajištění šikmé rázové vlny u nadzvukového proudění, u které nevzniká tak velká tlaková ztráta jako u kolmé rázové vlny. Na tvar vlny má vliv závislost úhlu kužele sondy na Machově čísle viz. obrázek 1.

V tomto článku je popsán můj podíl na daném výzkumu při stanovení daného charakteru. Jedná se o analýzy, na kterých bylo provedeno odladění systému Ansys Fluent pro analýzy nadzvukového proudění obtékající hrot sondy srovnáním s teorií isentropického jednorozměrového proudění, jako výchozí krok pro následné analýzy pro experimentální komoru uzpůsobenou pro proudění v nízkých tlacích.

2 TEORIE ISOENTROPICKÉHO JEDNOROZMĚROVÉHO PROUDĚNÍ

Závislost úhlu kužele sondy na úhlu rázové vlny vychází z teorie isentropického jednorozměrového proudění. Jako vstupní parametry pro výpočty poměrů hodnot v experimentální komoře, podle vztahů 1-8 [1,2] bylo tlakovými poměry v komorách, průměru a tvaru dýzy dáno Machovo číslo M_1 na 2,58 a úhel kužele sondy na 18° , který zajišťuje tvar šikmé rázové vlny.

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{2(M_1 \sin \alpha_s)^2 - 2}{(\kappa + 1)M_1^2 - 2(M_1 \sin \alpha_s)^2 + 2} \operatorname{ctg} \alpha_s \quad (1)$$

Změna hodnot hustoty, tlaku, teploty a Machova čísla po průchodu rázovou vlnou je řešena teorií isentropického jednorozměrného proudění pro kolmou (odtrženou) rázovou vlnu s daným úhlem.

$$M_{1n} = M_1 \sin \alpha_s \quad (2)$$

$$M_2^2 = \frac{2 + (\kappa - 1)M_{1n}^2}{2\kappa M_{1n}^2 - (\kappa - 1)} \quad (3)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{2(\kappa - 1)}{(\kappa + 1)^2} \cdot \frac{1 + \kappa M_{1n}^2}{M_{1n}^2} \cdot (M_{1n}^2 - 1) \quad (4)$$

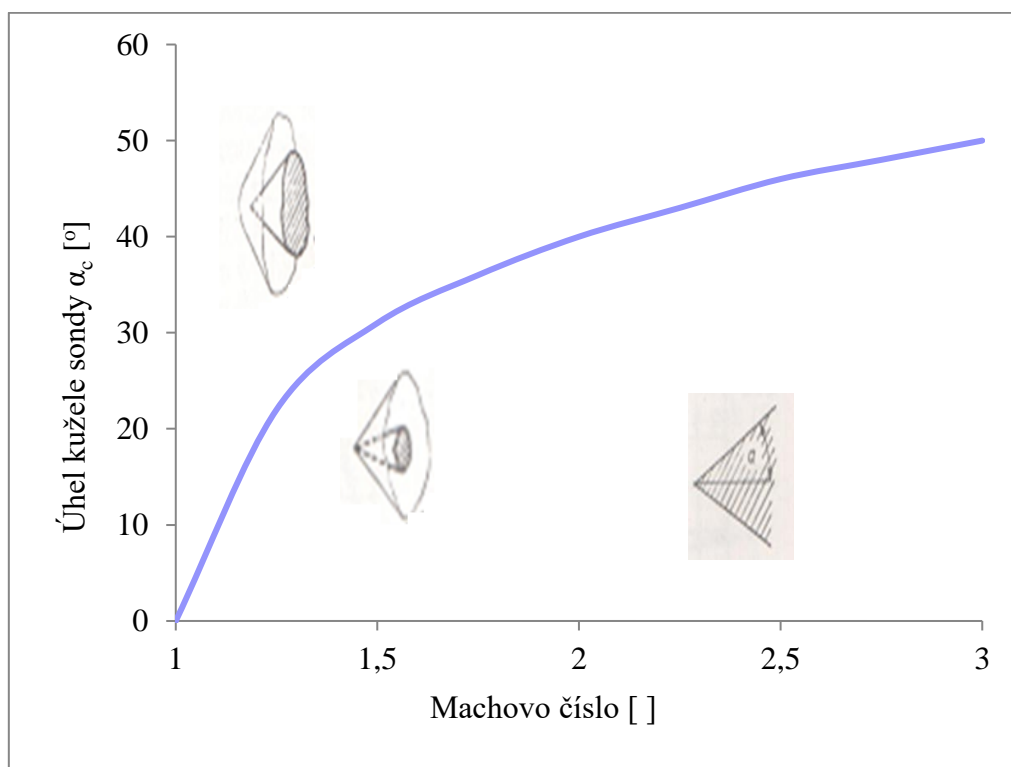
$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\kappa}{\kappa+1} (M_{1n}^2 - 1) \quad (5)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{(\kappa+1)M_{1n}^2}{2+(\kappa-1)M_{1n}^2} \quad (6)$$

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left[1 + \frac{2\kappa}{\kappa+1} (M_{1n}^2 - 1) \right]^{-\frac{1}{\kappa-1}} \left[\frac{(\kappa+1)M_{1n}^2}{2+(\kappa-1)M_{1n}^2} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (7)$$

$$\frac{p_{02}}{p_1} = \left[1 + \frac{2\kappa}{\kappa+1} (M_{1n}^2 - 1) \right]^{-\frac{1}{\kappa-1}} \left[\frac{\kappa+1}{2} M_{1n}^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (8)$$

; kde: κ – , α_c – úhel kužele sondy, α_s – úhel rázové vlny, M_{1n} – normálová složka Machova čísla, M_2 – Machovo číslo za šikmou rázovou vlnou, T_2 – Teplota za rázovou vlnou, T_1 – teplota před rázovou vlnou, p_2 – statický tlak za rázovou vlnou, p_1 – statický tlak před rázovou vlnou, ρ_2 – hustota za rázovou vlnou, ρ_1 – hustota před rázovou vlnou, p_{02} – celkový tlak za rázovou vlnou, p_{01} – celkový tlak před rázovou vlnou, p_c – tlak na kuželu, ρ_c – hustota na kuželu, T_c – teplota na kuželu .



Obrázek 1: Závislost úhlu kužele sondy na Machově čísle [3]

Dle výše uvedených vztahů 1-8 pro vstupní parametry $M_1=2.58$ a úhel kužele 18° vychází poměry tlaků, teploty a hustoty uvedené v tabulce č. 1.

p_1 [Atm]	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{p_c}{p_1}$	ρ_1 [kgm ⁻³]	$\frac{\rho_2}{\rho_1}$	$\frac{\rho_c}{\rho_1}$	T_1 [K]	$\frac{T_2}{T_1}$	$\frac{T_c}{T_1}$	p_{01} [MPa]	$\frac{p_{02}}{p_{01}}$
1	1,81	2,16	1,18	1,52	1,72	300	1,19	1,25	1,86	0,98

Tabulka 1: Poměry tlaků, teploty a hustoty.

Z daných poměrů byly ze vstupních údajů pro p_1 , ρ_1 , T_1 a p_{01} vypočteny Teoretické hodnoty, které byly porovnány s hodnotami získanými v systému Ansys Fluent (tabulka 2). Bylo provedeno změření úhlu probíhajícího gradientu tlaku a odpovídá hodnotě úhlu rázové vlny 30.66 stupňů [4, 5].

3 ANALÝZA RÁZOVÉ VLNY V PODMÍNKÁCH ATMOSFERICKÉHO TLAKU

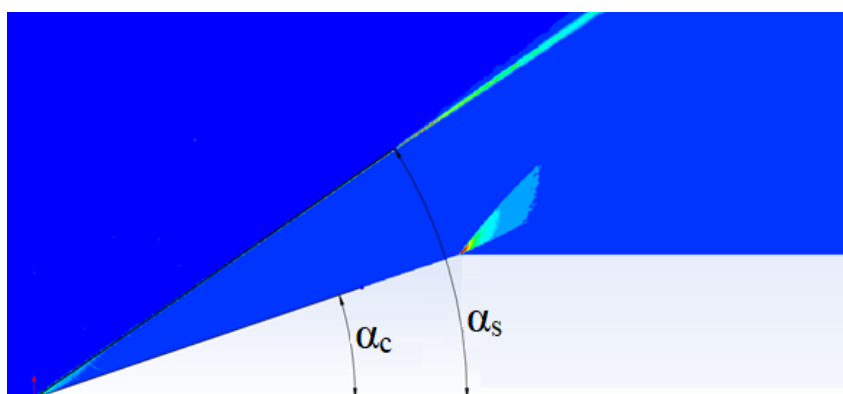
Na začátku byly provedeny matematicko – fyzikální analýzy v systému Ansys Fluent pro variantu s atmosférickým tlakem bez viskozity a s viskozitou plynu (obrázek 3). Pro tyto varianty jsme zvolili rychlost 2.58 Macha, úhel kužele sondy α_c 18° a úhel rázové vlny α_s 30.66° (obrázek 2). Variantu atmosférického tlaku bez viskozity plynu jsme srovnali s teorií fyziky isoentropického jednorozměrového proudění (rovnice 1-8). Výsledky tohoto srovnání lze najít v tabulce 2.

Dále jsme srovnali teoretické hodnoty fyziky isoentropického jednorozměrového proudění a hodnoty získané ze systému Ansys Fluent pro variant s atmosférickým tlakem bez viskozity s hodnotami pro atmosférický tlak s viskozitou, kde se již projevuje vliv tření na kuželu sondy (tabulka 2).

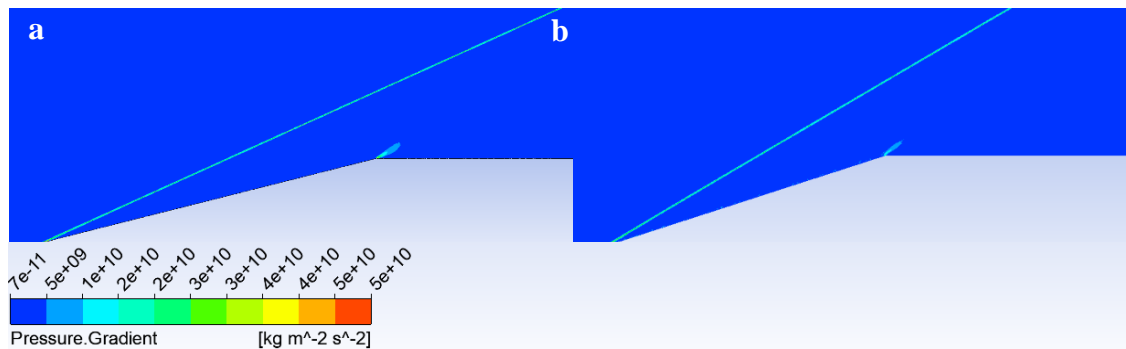
	p_2 [Pa]	p_c [Pa]	ρ_2 [kgm ⁻³]	ρ_c [kgm ⁻³]	T_2 [K]	T_c [K]	p_{02} [MPa]
Teoretická hodnota	183 264	218 737	1,79	2,03	357,5	376	1,81
Ansys hodnoty bez viskozity	183 555	221 633	1.77	2,03	358,3	376,4	1,82
Ansys hodnoty s viskozitou	191 261	221 782	1.83	1,18	363,3	649,3	1,855

Tabulka 2: Poměry tlaků, teploty a hustoty.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE



Obrázek 2: Definované úhly sondy a gradientu



Obrázek 3: a) gradient pro atmosférický tlak bez viskozity plynu, b) gradient pro atmosférický tlak s viskozitou plynu

Veškeré výpočty, které byly v mé práci uvedeny, byly realizovány v systému Ansys Fluent. Dle srovnání gradientu pro atmosférický tlak (obrázek 3) je patrné, že varianta s viskozitou i bez viskozity je téměř stejná, avšak u varianty s viskozitou se již projevuje tření na kuželu sondy. Dané analýzy byly podkladem pro odladění systému Ansys Fluent pro analýzy nadzvukového proudění obtékající hrot sondy, jako výchozí krok pro následné analýzy pro experimentální komoru uzpůsobenou pro proudění v nízkých tlacích.

Jako vhodné nastavení systému Ansys Fluent, které prokázalo souhlasné výsledky s teorií isoentropického jednorozměrového proudění, byla nastaveno implicitní konfigurace solveru Density Based. Dále jsme použili výpočetní schéma AUSM (Advection Upstream Splitting Method), které se prokázalo jako vhodnější pro řešení nadzvukového proudění. Pro diskretizaci bylo použito schéma second order Upwind.

REFERENCE

- [1] Salga, J.; Hoření, B. Tabulky proudění plynu. UNOB, Brno, 1997.
- [2] ŠABACKÁ, Pavla. *Analýza nadzvukového proudění v experimentální komoře při vložení tlakových a teplotních sond*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126865>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.
- [3] Dejč, M. J. *Technická dynamika plynů*. SNTL, 1967
- [4] Moran. M.; Shapiro, H. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 1996.
- [5] Škorpík, J. *Proudění plynů a par tryskami*, Transformační technologie. Brno, 2006.