INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005
NÁRODNÍ KONFERENCE
s mezinárodní účastí
Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

THE FLOW FIELD IN THE ENTRANCE PART OF A WIND TUNNEL

T. Hofer, P. Šafařík, M. Luxa[1]

Summary: *The work deals with numerical solution of 3D viscous steady incompressible flow of air passing through the entrance part of a new wind tunnel for the Aerodynamic Laboratory in Nový Knín. The nozzle was designed by RNDr. P. Jonáš, DrSc. The aim of this work was to apply the numerical simulation of the flow into the design process of the nozzle in order to verify the quality of the design. The numerical simulation was carried out using the Fluent 6.1 solver. The mesh was prepared using the pre-processor Gambit 2.0.*

1. Úvod

Pro aerodynamická měření je nutno zajistit proud media, resp. vzduchu, o konkrétních parametrech a v konkrétním režimu proudění, v tomto případě vyrovnaný proud vzduchu určité rychlosti, ideálně proud konstantního rychlostního profilu. To umožňuje kontrakční dýza, která proud urychlí a jeho případné nerovnoměrnosti tím urovná. Každý aerodynamický tunel alespoň průměrné kvality obsahuje kontrakční dýzu. Existuje však nebezpečí, jež představuje příliš rychlá kontrakce způsobující odtržení proudu v oblasti za inflexním bodem dvousinusové křivky vytvářející meridián dýzy. To lze eliminovat jen vhodnou volbou parametrů obou křivek. Numerickou simulací proudění v takové dýze lze pak sledovat průběh parametrů proudu, např. tečného napětí na stěně, který odhaluje odtrhávání proudu, apod.

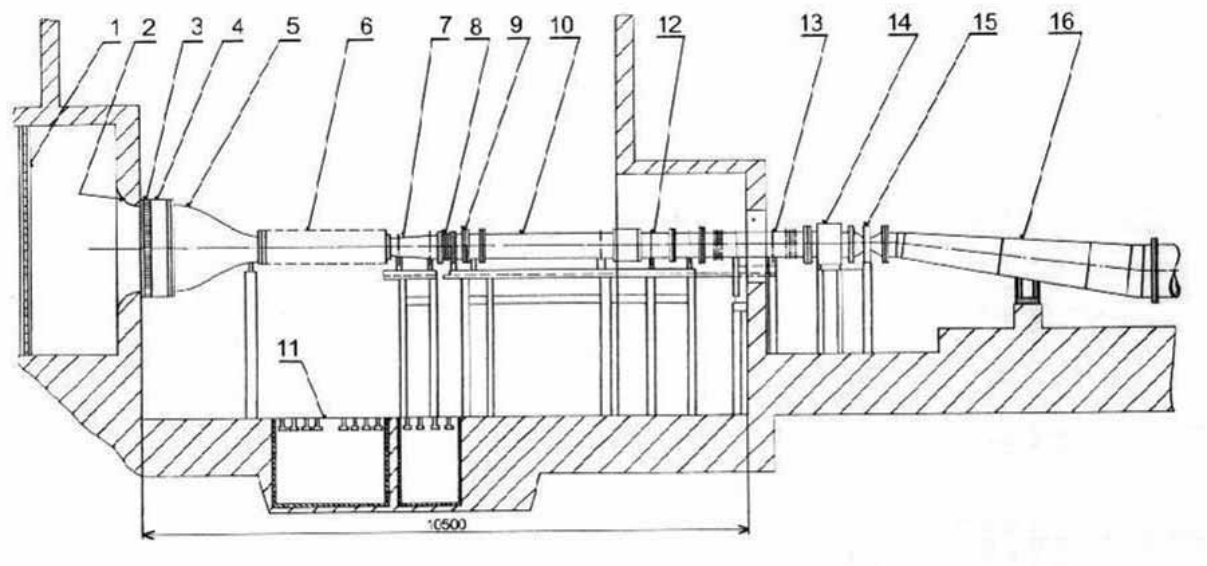
Potíží pro aerodynamická měření je sekundární proudění realizující se koutovými víry, které deformují rychlostní profil a zkreslují tím pozorování. Tyto víry, resp. jejich velikost či výskyt vůbec, lze ovlivnit vhodnou volbou geometrie v koutech, jako zaoblení nebo zkosení (Jonáš, 2004). Vlastností těchto vírů je měnící se směr rotace v závislosti na režimu proudění. Tzn., že při laminárním proudění mají opačnou orientaci než při proudění turbulentním (Lübcke et al., 2003).

Pro kvalitní aerodynamický tunel je tedy třeba navrhnout vhodnou geometrii vstupní části vzhledem k požadavkům na měřící prostor. Možnost zdokonalení návrhové metody představuje právě numerická simulace proudění touto geometrií, která je s to odhalit případné nedokonalosti vstupní části před její výrobou nebo uvedením do provozu.

[1] Ing. Tomáš Hofer, Doc. Ing. Pavel Šafařík, CSc., Ing. Martin Luxa: Ústav Termomechaniky Akademie Věd ČR; Dolejškova 5, 182 00 Praha 8; tel. +420.266 053 303; email: hofer@it.cas.cz

2. Geometrie

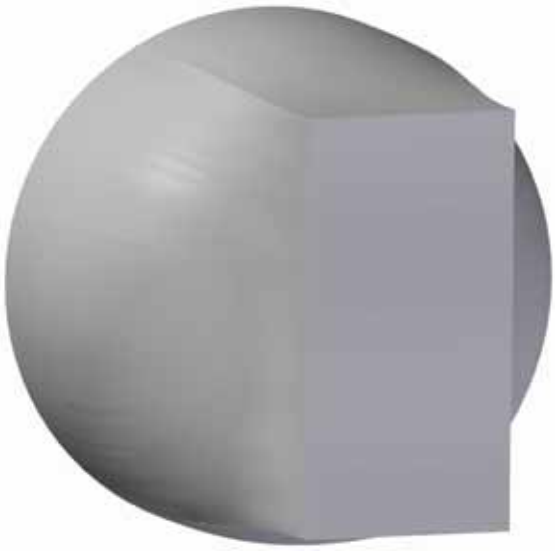
Nový stavebnicový aerodynamický tunel s výměnným měřícím prostorem je budován v laboratoři vysokých rychlostí v Novém Kníně, viz obr. 1. Návrhový postup jeho vstupní části je předmětem zájmu této práce.



Obr. 1 Aerodynamický tunel.

Uvažovaná část tunelu se skládá ze vstupní části a přechodové části s měřícím prostorem. Vstupní část tvoří vstupní hrdlo 2, uklidňovací prostor sít 4 a kontrakční dýza 5, viz obr. 1. Meridiánem vstupního hrdla je část lemniskáty. U kontrakční dýzy to jsou dva plynule na sebe navazující sinové oblouky. Uklidňovací prostor je válcovitá součást spojující vstupní hrdlo a kontrakční dýzu. Vstupní část je rotačně symetrická, což umožňuje zjednodušení simulace proudění na 2D. Síť vytvořená na této části geometrie v preprocesoru Gambit 2.0 je strukturovaná.

Přechodová část 6 je tvořena přechodovou kontrakční dýzou a měřícím prostorem. Přechodová kontrakční dýza, připojená za kontrakční dýzu, zajišťuje plynulý přechod poloměru křivosti geometrie ze vstupního kruhového průřezu kontrakční dýzy na obdélníkový průřez měřícího prostoru, viz obr. 2. Meridiánem této dýzy jsou také dvousinusové oblouky a měřící prostor je konstantního průřezu. Přechodová dýza je srovnávána s variantou dýzy tvořenou přímkovými plochami a měřící prostor konstantního průřezu s variantou zaoblenou na konci v rozích poloměrem 10, 20, 30 a 40 mm. Jelikož je tato část symetrická, lze výpočet provézt pouze na jedné její čtvrtině a na plochách symetrie předepsat podmínku symetrie. Síť vytvořená na této části geometrie v preprocesoru Gambit 2.0 je strukturovaná.



Obr. 2 Přechodová kontrakční dýza.

3. Okrajové podmínky

Na vstupu je zadán rychlostní profil. Této okrajové podmínky lze užít v případě nestlačitelného proudění. U stlačitelného proudění by použití takové podmínky nevedlo k fyzikálně správnému výsledku. Při výpočtu turbulentního režimu jsou předepsány ještě intenzita turbulence (0,05%) a hydraulický průměr vstupního průřezu.

Na stěně je předepsána podmínka nulové rychlosti (ulpívání proudu na stěně). Pro výpočet veličin v turbulentním režimu blízko stěny jsou použity standardní stěnové funkce, které jsou v inženýrské praxi pro tento účel používány nejčastěji (univerzální zákon stěny pro příspěvek od střední rychlosti).

Na výstupu je zadán statický tlak (přetlak/podtlak) konstantní po ploše výstupu. Tuto podmínku lze použít, je-li proudění subsonické a lze-li předpokládat, že kanál před výstupem je natolik dlouhý, aby na jeho konci bylo vyvinuté proudění (vyvinutý rychlostní profil). Při výpočtu turbulentního režimu jsou předepsány ještě intenzita turbulence (0,05%) a hydraulický průměr výstupního průřezu.

4. Numerická simulace

Řeší se model vazkého laminárního i turbulentního, nestlačitelného, stacionárního proudění vzduchu na strukturované síti ve 2D nebo ve 3D. Pro výpočet je užito metody konečných objemů na buňkách typu cell – centered, jejíž stabilita je zaručena implicitní formou výpočtu. Konvektivní členy řešené soustavy rovnic jsou diskretizovány užitím mocninného schématu, které interpoluje hodnotu proměnné Φ na počítaném elementu, použitím exaktního řešení na jednodimenzionální rovnici konvekce – difúze,

$$\frac{d}{dx}\left(\rho u \Phi\right) = \frac{d}{dx}\left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right) \tag{1}$$

kde Γ (difúzní koeficient) a ρu jsou na intervalu ∂x konstantní[2].

Hodnota veličiny Φ je pro vysoké Pécletovo číslo, definující lokální poměr intenzity konvekce k intenzitě difúze ($Pe = \frac{\rho u L}{\Gamma}$), přibližně rovna hodnotě proti proudu a může být nahrazena hodnotou na elementu proti proudu, což pro Fluent znamená standardní upwinding (silné proudění – převažuje konvekce).

Je-li Pe = 0 (žádné proudění nebo slabá difúze), může být proměnná Φ jednoduše interpolována lineárním průměrem z hodnot v x = 0 a x = L. Má-li pak Pe číslo střední hodnotu, musí být interpolovaná hodnota Φ v $x = L/2$ obdržena aplikací rovnice

---

[2] Vychází z platnosti rovnice kontinuity $\frac{d}{dx}\left(\rho u\right) = 0$.

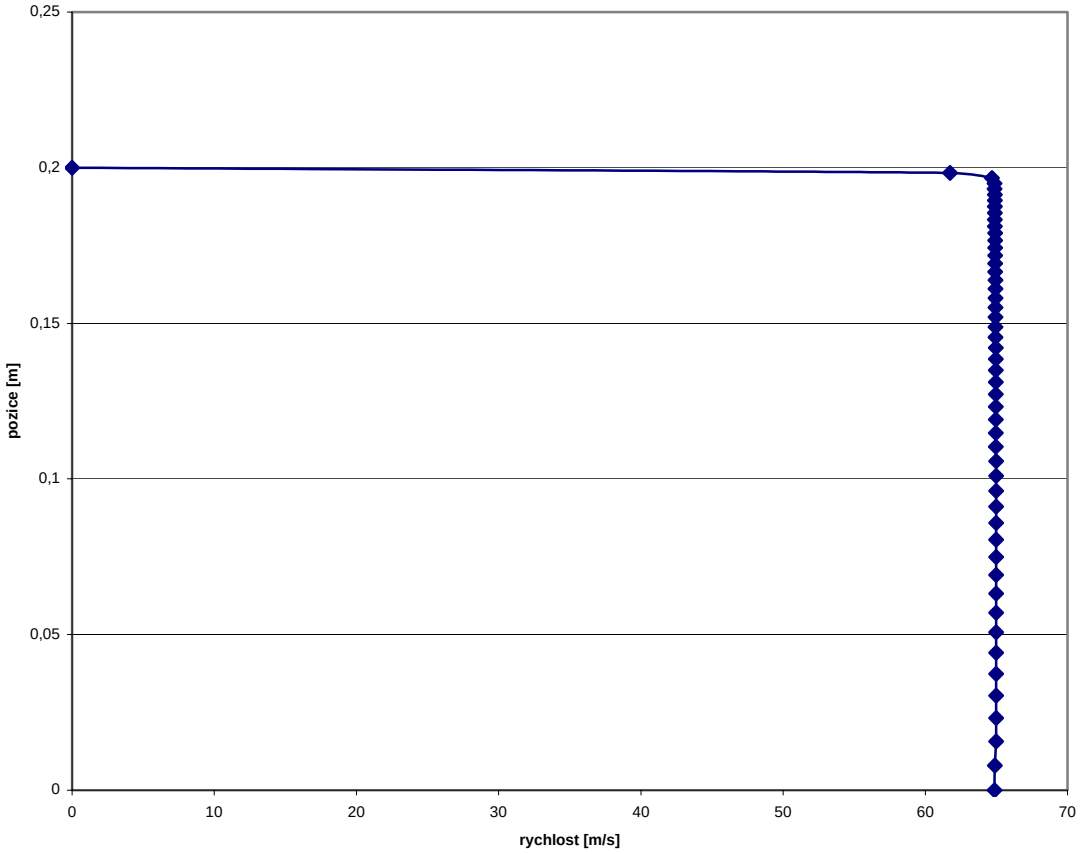
$$\frac{\Phi(x)-\Phi_0}{\Phi_L-\Phi_0}=\frac{e^{Pe\frac{x}{L}}-1}{e^{Pe}-1}, \tag{2}$$

Pro výpočet nestlačitelného proudění je užit segregovaný řešič (Vogel, 2003). Korekce tlaku při výpočtu rychlostního pole je provedena pomocí algoritmu SIMPLEC (Vogel, 2003).

V turbulentním režimu je řešen systém Reynoldsových rovnic RANS, reprezentujících transportní rovnice jen pro časově střední proudové veličiny, s modelováním všech měřítek turbulence, ke kterým lze dospět použitím Reynoldsovy představy, že při turbulentním proudění jsou okamžitá pole parametrů proudění (rychlost, tlak, teplota, koncentrace) superpozicí polí časově středních hodnot a polí náhodných fluktuací (Jonáš, 1998), kdy se proměnná řešení v exaktních Navierových-Stokesových rovnicích rozkládá na střední a fluktuační složku. Objektem zájmu jsou také výsledky anizotropie v Reynoldsových napětích, resp. napětím indukované sekundární proudění. Proto jsou v turbulentním režimu proudění řešeny exaktní transportní rovnice pro transport Reynoldsových napětí užitím modelu Reynoldsových napětí RSM.

5. Výsledky

Důležitým výsledkem simulace na rotačně symterické části je rychlostní profil na výstupním řezu kontrakční dýzy, který je použit jako okrajová podmínka na vstupu do přechodové kontrakční dýzy, viz obr. 3.

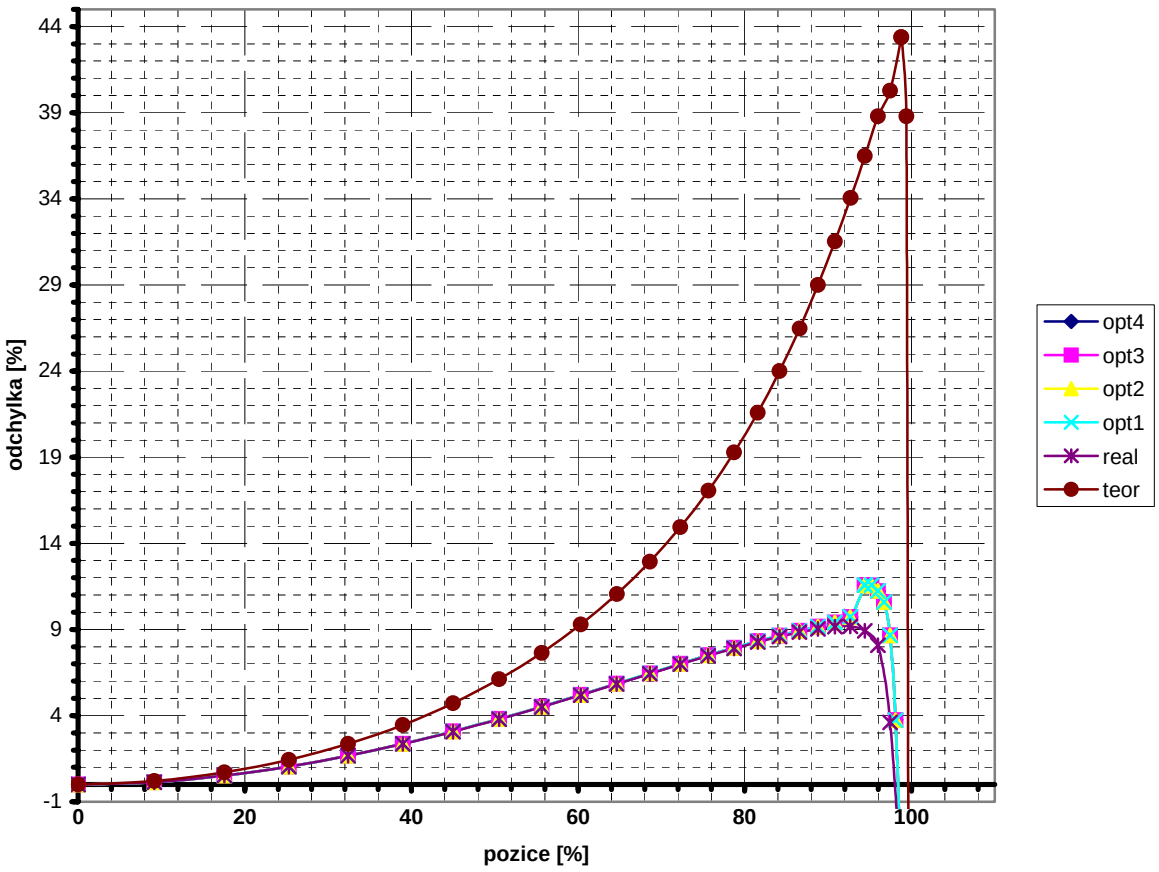


Obr. 3 Rychlostní profil na výstupu z kontrakční dýzy.

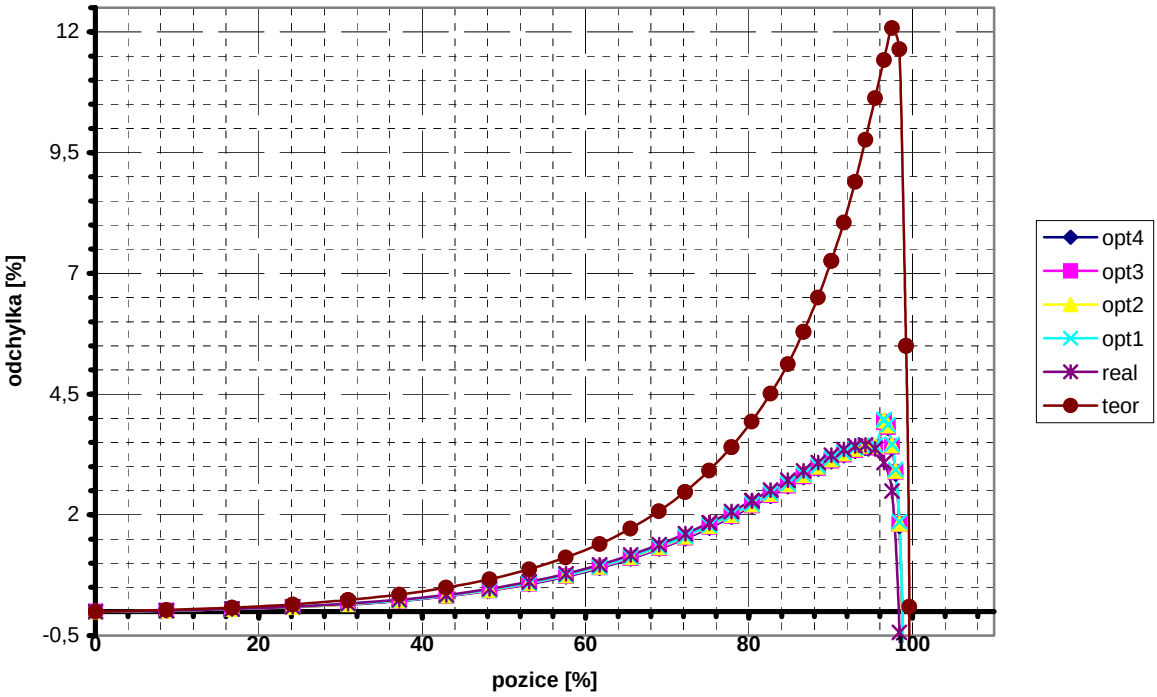
Stěžejními výsledky jsou grafy odchylek rychlostního profilu od rychlosti v ose (obr. 4 až 7), které určují kvalitu proudu a omezení prostoru, v němž je možné měření. Tyto grafy jsou vynášeny v procentech a jejich legenda je následující:

- real – vyrobená přechodová dýza, viz obr. 2, s měřícím prostorem konstantního průřezu.
- opt4 – vyrobená přechodová dýza s měřícím prostorem na konci v rohu zaobleným poloměrem 40 mm.
- opt3 – vyrobená přechodová dýza s měřícím prostorem na konci v rohu zaobleným poloměrem 30 mm.
- opt2 – vyrobená přechodová dýza s měřícím prostorem na konci v rohu zaobleným poloměrem 20 mm.
- opt1 – vyrobená přechodová dýza s měřícím prostorem na konci v rohu zaobleným poloměrem 10 mm.
- teor – přechodová dýza z přímkových ploch s měřícím prostorem konstantního průřezu.

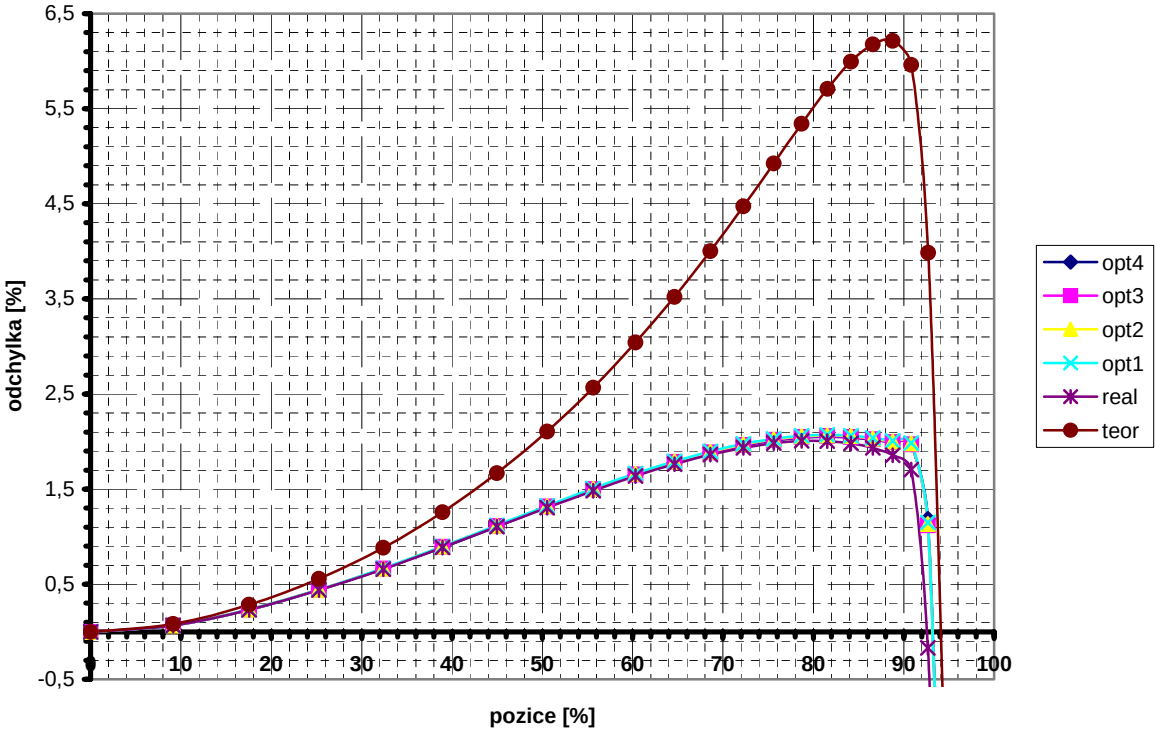
Odchylky jsou vynášeny v osách řezů na výstupu z přechodové kontrakční dýzy a v 80% měřícího prostoru.



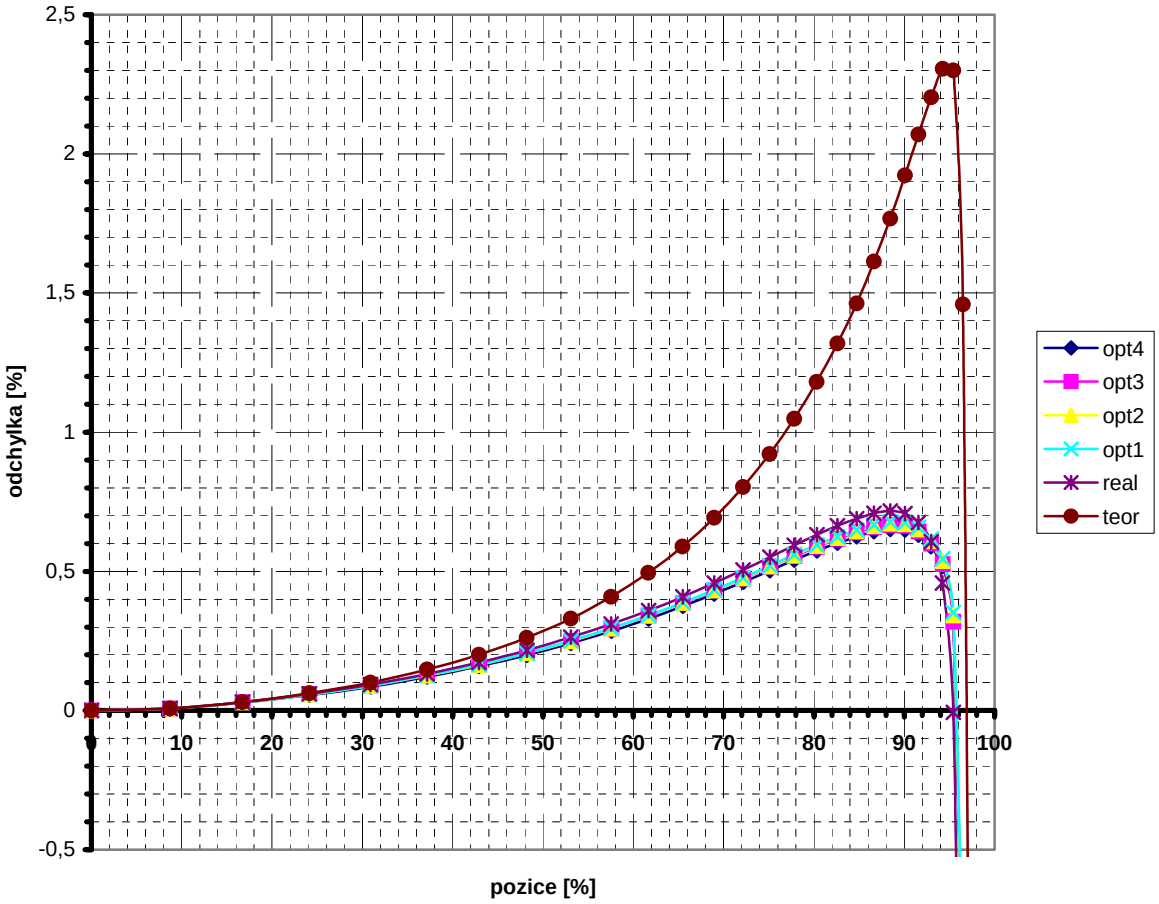
Obr. 4 Odchylka rychlosti od rychlosti v ose po šířce středního řezu na výstupu z přechodové kontrakční dýzy.



Obr. 5 Odchylka rychlosti od rychlosti v ose po výšce středního řezu na výstupu z přechodové kontrakční dýzy.



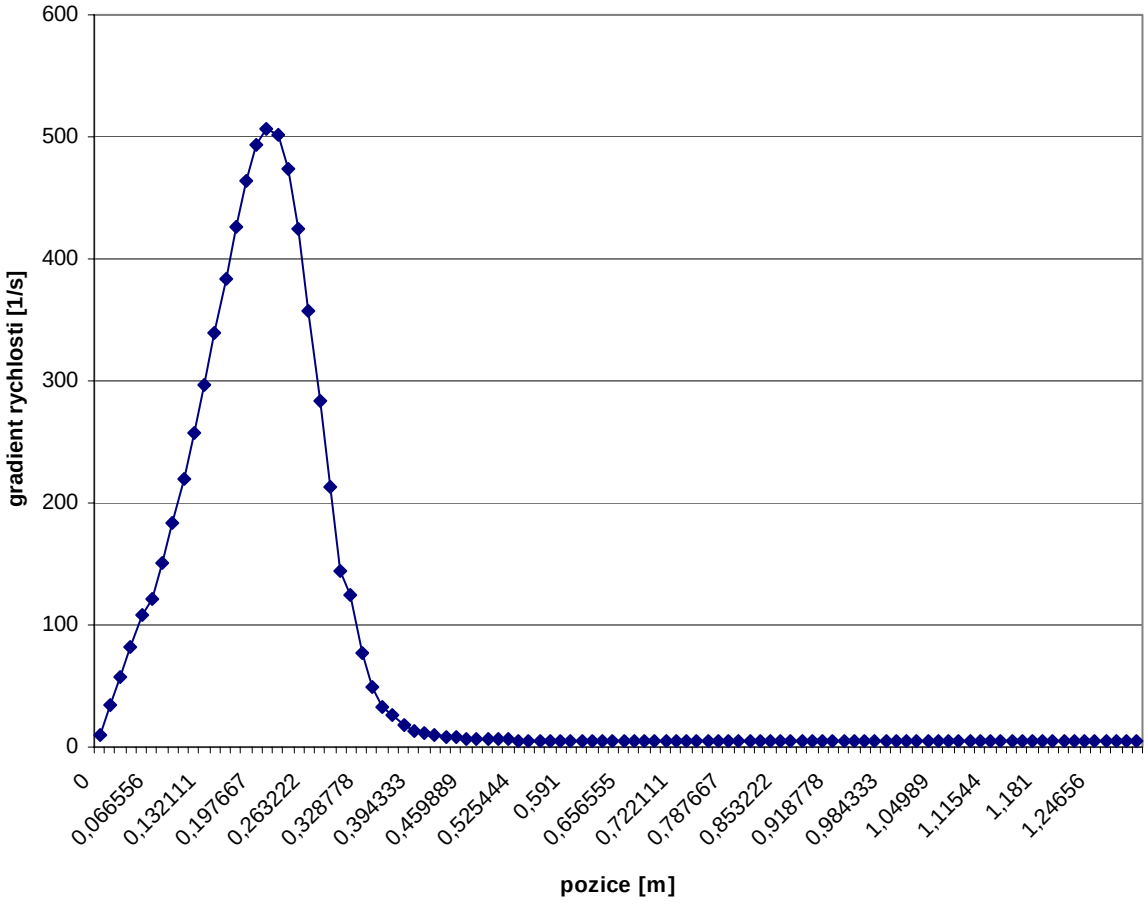
Obr. 6 Odchylka rychlosti od rychlosti v ose po šířce středního řezu v 80% měřícího prostoru.



Obr. 7 Odchylka rychlosti od rychlosti v ose po výšce středního řezu v 80% měřícího prostoru.

Dalším měřítkem kvality aerodynamického tunelu je průběh gradientu rychlosti v ose tunelu, viz obr. 8. Ten musí být v kvalitním aerodynamickém tunelu konstantní, kladný a blízký nule. Jeho velikost pak určuje, nakolik je třeba rozevřít stěny tunelu, aby rychlost v ose byla konstantní. Kompenzuje se tak pošinovací efekt mezní vrstvy, která tento malý kladný gradient způsobuje.

Možnost odtržení proudu je vyloučena, protože není v žádném místě stěn splněna podmínka odtržení proudu, totiž nulová hodnota tečného napětí. To lze ukázat díky průběhům tečného napětí na stěnách, které nikde neklesají k nule.



Obr. 8 Průběh gradientu rychlosti

6. Závěr

Největším problémem celého výpočtu je vytvořit vhodnou strukturovanou síť pro všechny geometrie přechodové dýzy, aby se řešení blížilo řešení přesnému. To je samozřejmě nejtěžší v modelování turbulentního režimu, kde o konvergenci numerického řešení k řešení přesnému nelze vůbec hovořit.

Z průběhu tečného napětí na stěnách zkoumaných částí tunelu i jejích modifikací v měřicím prostoru lze usuzovat, že k odtržení proudu nedojde na žádném z kritických míst, tj. ani za inflexním bodem vytvářející dvousinusové křivky, ani na přechodu dýza – měřicí prostor. Průběh je po všech stěnách celé uvažované části nenulový.

Ze srovnání grafů odchylek rychlostních profilů od rychlosti v osách středních řezů na výstupu z přechodové dýzy a v 80% měřícího prostoru (obr. 4 – 7) plyne, že geometrie s vyrobenou dýzou (obr. 2) bez optimalizovaného měřícího prostoru dává prakticky stejně kvalitní proudové pole jako geometrie s optimalizovanými měřícími prostory. Rozdíly jsou tak nepatrné, že optimalizaci zaoblením na konci měřícího prostoru nelze na základě této

simulace doporučit. Naproti tomu je z těchto grafů zřetelně vidět, že je absolutně nevhodné použít pro takovou kontrakci dýzu tvořenou jednoduchými přímkovými plochami.

Závěrem lze tedy zcela jednoznačně matematickou simulací potvrdit vhodnost použití přechodové dýzy tvořené dvousinusovými křivkami v porovnání s geometrií tvořenou přímkovými plochami a připojení měřícího prostoru konstantního průřezu splňujícího nároky na dobrou kvalitu proudu.

Numerická simulace se tímto ukázala jako vhodná součást návrhového postupu geometrie vstupní části aerodynamického tunelu. Zařazením výpočtové části, simulující proudění vzduchu geometrií aerodynamického tunelu se ověřuje příznivost návrhu geometrie a může se ukázat zdokonalení jejího provedení.

8. Literatura

Jonáš, P.: *Návrh úpravy aerodynamického výtlačného tunelu pro výzkum proudění v kanálu s náhlým rozšířením průřezu*; in *Topical Problems of Fluid Mechanics 2004, Proceedings*, s. 63-68, Praha 2004.

Lübcke, H. M.; Rung, Th.; Thiele, F.: *Prediction of the Spreading Mechanism of 3D Turbulent Wall Jets with Explicit Reynolds-Stress Closures*; *Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 24, č. 4, 2003, s. 434-443. (článek přístupný online www.sciencedirect.com)

Květoň, J.: *Vysokorychlostní aerodynamický tunel pro lopatkové mříže*, Zpráva č. Z-202/65, ČSAV ÚT, Praha, 1965.

Luxa, M.; Šafařík, P.: *Realization of Aerodynamic Tunnel with Interchangeable Test Sections*, in *Fluid Mechanics and Thermodynamics, Proceedings of Student's Work in the Year 2000/2001*, Fakulta strojní ČVUT, Praha, 2001.

Luxa, M.; Jonáš, P.; Šafařík, P.: *Eintrittentwurf des Windkanals*, s. 29-39; in *Fluid Mechanics and Thermodynamics, Proceedings of Student's Work in the Year 2001/2002*, Fakulta strojní ČVUT, Praha, 2002.

Jonáš, P.: *Design of an Axisymmetric Contraction*, (Private Communication), Praha, 1991.

Hofer, T.; Šafařík, P.; Hyhlík, T.; Luxa, M.: *Proudění ve vstupní části do aerodynamického tunelu*, in *Fluid Mechanics and Thermodynamics, Proceedings of Student's Work in the Year 2002/2003*, Fakulta strojní ČVUT, Praha, 2003, s. 13-22.

Dvořák, R.; Kozel, K.: *Matematické modelování v aerodynamice*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996.

Jonáš, P.: *O turbulenci*, *Inženýrská mechanika*, vol.5, n.2, Praha, 1998, p.89-106.

Vogel, J.: *Přednášky*, (zdroj Patancar, S.:) nepublikováno, Praha, 2003.

Hofer, T.: *Numerical Simulation of 3D Flow in the Entrance Part of Wind Tunnel*, interní zpráva, Praha, 2004.