



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

2-D EXTERNÍ AERODYNAMIKA TĚLESA NESTANDARDNÍHO TVARU

2-D EXTERNAL AERODYNAMICS OF AN UNUSUAL SHAPED BODY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Mohyla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Dohnal

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Daniel Mohyla
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Miloslav Dohnal
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

2-D externí aerodynamika tělesa nestandardního tvaru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rostoucím začleňováním pokročilých CAD systémů do procesu návrhu a výroby průmyslových zařízení se tato zařízení stávají stále více komplexnější. Komplikované geometrie často sebou přináší i složité proudové pole (proudění s odtržením a připojením mezní vrstvy). Na tyto typy proudění klasické turbulentní modely nestačí z důvodu filtrování části turbulentního spektra. Proto jsou stále více žádané simulace s využitím pokročilých modelů turbulence (DES, SAS, atd.). Použití těchto model přináší dodatečné nároky na vyhodnocení a přesnost výsledku. Jednou ze základních vyhodnocovacích metod je tzv. test nezávislosti sítě. Řešení tohoto úkolu bude provedeno ve freeware CFD programu OpenFOAM, jehož využití v koncernových i korporátních firmám progresivně nabývá na četnosti.

Cíle bakalářské práce:

- Vytvořit výpočetní doménu a síť pomocí BlockMesh
- Provést test nezávislosti řešení na výpočetní síti.
- Vyřešit proudění pomocí jednoho z klasických RANS modelů
- Vyřešit proudění s využitím pokročilejšího modelu turbulence
- Porovnat a analyzovat výsledky z obou modelů

Seznam literatury:

OpenFOAM User's Guide, OpenCFD, Ltd., Bracknell, 2015

Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. "An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method", Longman Group Ltd., 1995

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na analýzu jevu proudění kapaliny kolem válcové tyče v 2-D prostoru za využití metodiky výpočtové dynamiky tekutin (CFD) s populárními modely turbulence $k-\omega$ SST and $k-\omega$ SSTAS. První část této práce je úvodem do problematiky o obtékání těles proudem kapaliny a uvedení pojmu CFD. V této části jsou popsány jevy jako odtržení mezní vrstvy od tělesa, modelování turbulence a popis různých modelů turbulence. Druhá část pojednává o nastavení výpočetní domény simulace uvnitř open source softwaru OpenFOAM a získaných výsledcích z domény. Poslední část se věnuje diskuzi o dosažených výsledcích a jsou porovnány s experimentem.

Abstract

This bachelor thesis is focused on analysis of flow over a cylindrical rod in 2-D space by using computational fluid dynamics (CFD) with turbulence models $k-\omega$ SST and $k-\omega$ SSTAS. First part of this thesis is meant to be an introduction to the topic of external flow and CFD. In this part the topics of flow separation, turbulence modeling and various related models are discussed. Second part deals with the description of simulation case inside of open source CFD software called OpenFOAM and the obtained results. In last part the discussion about results is carried out and results are compared.

Klíčová slova

CFD, OpenFOAM, proudění kapalin, obtékání těles, výpočtová dynamika tekutin, simulace

Keywords

CFD, OpenFOAM, fluid flow, external flow, computational fluid dynamics, simulation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma 2-D externí aerodynamika tělesa nestandardního tvaru vypracoval samostatně na základě konzultací s vedoucím této práce a za pomoci odborné literatury a dalších pramenů informací uvedených na konci této práce.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....
Podpis

Bibliografická citace

MOHYLA, D. 2-D externí aerodynamika tělesa nestandardního tvaru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloslav Dohnal.

Poděkování

Tímto bych chtěl hlavně poděkovat panu Ing. Miloslavu Dohnalovi za jeho ochotu, cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu, kterou jsem při vypracovávání této práce obdržel.

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Co je to CFD?	1
1.2 Aplikace CFD	1
1.3 Obtékání těles	1
1.3.1 Mezní vrstva	1
1.3.2 Odtržení proudu	3
1.3.3 Odpor těles	5
2 Modelování turbulence	7
2.1 Krátce o turbulenci	7
2.2 Úvod do modelování turbulence	8
2.2.1 Direct Numerical Simulation (DNS)	8
2.2.2 Large Eddy Simulation (LES)	8
2.3 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)	9
2.3.1 Dvourovnicový model turbulence $k-\omega$	10
2.3.2 Model $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport)	10
2.3.3 SAS (Scale-Adaptive Simulation)	10
3 Řešení	11
3.1 Rozbor zadání	11
3.2 Nastavení simulace	11
3.2.1 Výpočetní doména	11
3.2.2 Geometrie	11
3.2.3 Fyzikální vlastnosti proudícího média	13
3.2.4 Okrajové podmínky	13
3.2.5 Časový krok	14
4 Analýza proudění okolo válce	16
4.1 Test nezávislosti řešení na výpočetní síti	16
4.2 Střední rychlosti	17
4.3 Součinitele odporu	20
5 Závěr	21
6 Seznam použité literatury	22
7 Seznam obrázků	23
8 Seznam tabulek	24
9 Seznam použitých symbolů a zkratk	25
10 Přílohy	26

1 Úvod

Cílem této kapitoly je uvést problematiku výpočtové dynamiky tekutin a její využití.

1.1 Co je to CFD?

Řešení proudění kapalin je poměrně častým problémem při navrhování. Analytické metody a teoretické popisy proudění kapalin jsou v praxi použitelné jen zřídka. Rovnice popisující proudění kapalin jsou značně komplexní a jsou použitelné jen pro úzký okruh úloh. Lze provádět experimentální metody pro zjištění proudů kapalin, avšak tyto metody jsou velmi drahé a náročné (např. aerodynamický tunel). Metoda výpočtové dynamiky tekutin (anglicky Computational Fluid Dynamics – dále jen CFD) je moderní disciplína, která se zabývá předvíáním proudění kapalin a pomáhá nám urychlit proces návrhu.

1.2 Aplikace CFD

Metoda výpočtové dynamiky tekutin má celou řadu využití. Můžeme se s ní setkat například v leteckém průmyslu, kde slouží pro predikci proudění kolem letounu. V automobilovém průmyslu je běžně k vidění využití CFD pro analýzu a optimalizaci karoserie, výfukových systémů nebo spalovacích motorů. CFD se dále používá pro návrh zařízení, jako jsou čerpadla a turbodmychadla. Dále se s touto problematikou můžeme ještě setkat v architektuře a celé další řadě aplikací. Aplikace uvedené zde jsou jenom zlomek toho, kde se CFD s úspěchem používá.

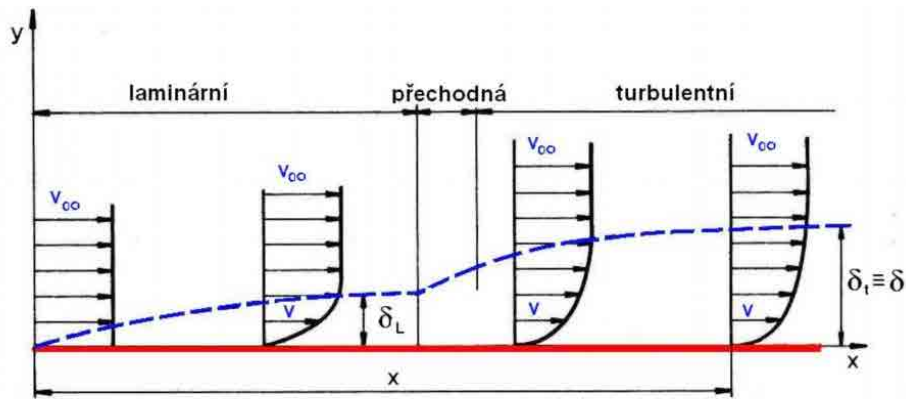
1.3 Obtékání těles

S obtékáním těles se často setkáváme v našem každodenním životě. Právě tento jev je zodpovědný za jevy jako odpor, který působí na automobily, odpor na elektrické vedení, stromy a podvodní potrubí [5]. Dalším jevem, který je důsledkem obtékání těles, je vztlak.

1.3.1 Mezní vrstva

Při pohybu tělesa tekutinou (nebo pohybu tekutiny proti tělesu) molekuly tekutiny blízké tělesu jsou narušeny a pohybují se kolem tělesa, což má za následek vznik aerodynamických sil (vztlakové a odporové síly). Velikost těchto sil je závislá na tvaru tělesa, rychlosti tělesa, hmotnosti kapaliny proudící kolem tělesa a na dalších dvou důležitých vlastnostech kapaliny: viskozitě a kompresibilitě kapaliny [3].

Aerodynamické síly závisí především na viskozitě kapaliny. Při pohybu kapaliny přes těleso dochází k úplnému zastavení pohybu molekul kapaliny, které zaujímají nulovou rychlost relativně vůči k rychlosti nad tělesem. Tyto molekuly následně zpomalují částice nad nimi vzájemnou kolizí. Tento proces se opakuje až do určité vzdálenosti, kdy se rychlost proudu kapaliny opět ustálí. Tento jev vytváří tenkou vrstvu nad povrchem tělesa, kde se rychlost mění z nuly na povrchu tělesa až na hodnoty rychlosti nenarušeného proudu. Této vrstvě se říká mezní vrstva, pojem, který zavedl Ludwig Prandtl [3].



Obrázek 1.1 Mezní vrstva na desce (převzato z [4])

Abychom byli dále schopni posoudit mezní vrstvu, je vhodné si zavést Reynoldsovo číslo Re , které je definované následujícím vztahem:

$$Re = \frac{v_{\infty} L}{\nu} \quad (1.1)$$

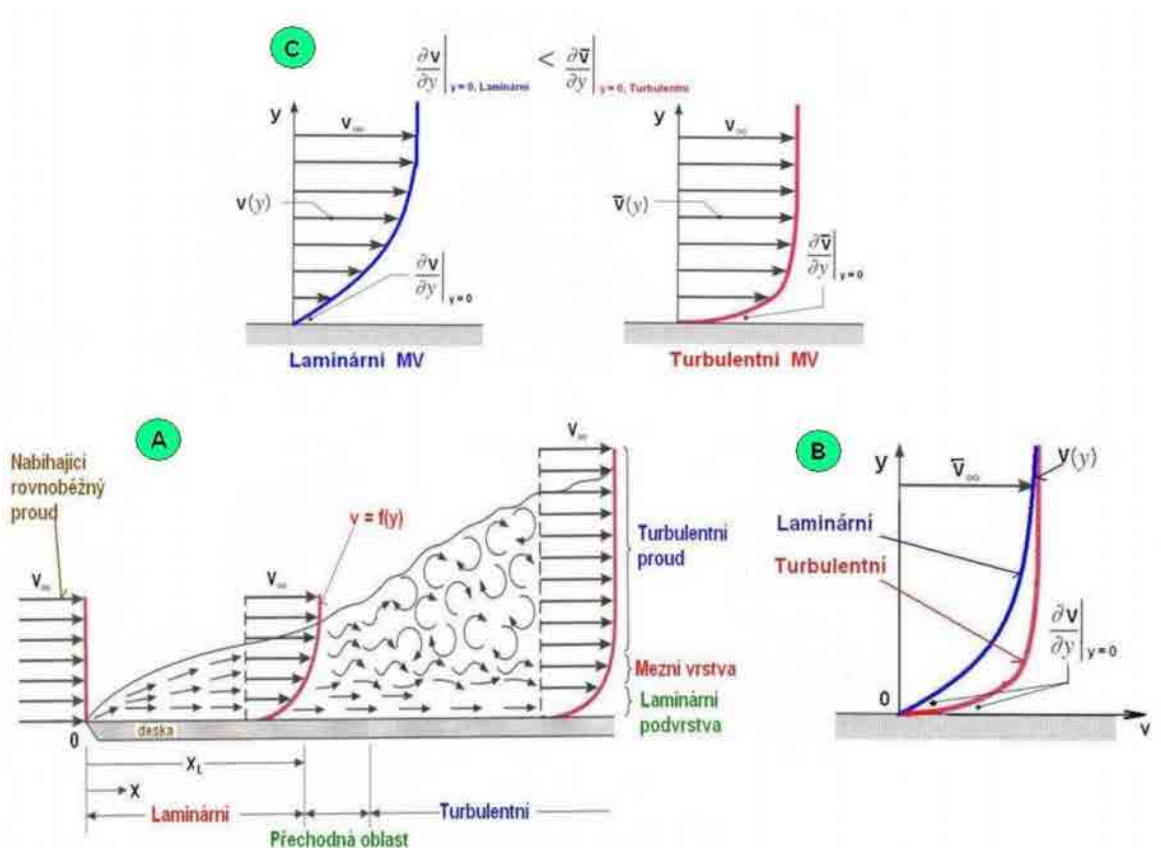
kde:

v_{∞} - rychlost nenarušeného proudu před tělesem [m/s]

L - charakteristický rozměr [m]

ν - kinematická viskozita [m²/s]

Reynoldsovo číslo vyjadřuje poměr setrvačných sil a viskózních sil. V závislosti na Reynoldsově čísle rozeznáváme dva druhy proudění kapaliny v mezní vrstvě. Pro menší Reynoldsova čísla je charakter proudění laminární a rychlost se mění rovnoměrně. Pro vyšší Reynoldsova čísla je charakter proudění turbulentní, který je charakterizován nestacionárním vířením kapaliny uvnitř mezní vrstvy. Rozdíly tvaru profilu laminární a turbulentní vrstvy jsou vyobrazeny na následujících obrázcích.



Obrázek 1.2 Rychlostní profil u laminární a turbulentní mezní vrstvy (převzato z [4])

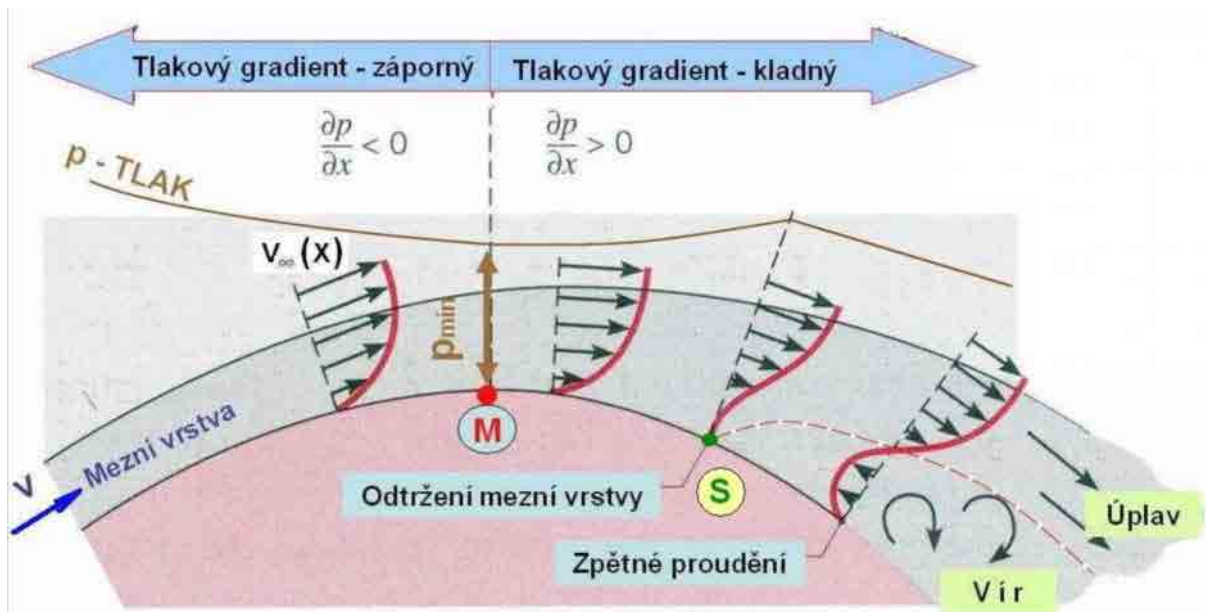
Lze si všimnout, že rychlostního gradientu laminárního proudění je menší než rychlostní gradient u turbulentního proudění. Turbulentní mezní vrstva je podstatně širší, což je zapříčiněno turbulencí v mezní vrstvě. Tloušťka mezní vrstvy je v porovnání s obtékaným tělesem velmi malá, její tloušťka dosahuje hodnot setin nebo tisícín charakteristické délky tělesa [4].

1.3.2 Održení proudu

Z předchozích odstavců je patrné, že vznik rychlostního gradientu je zapříčiněn rozdílným prouděním kapaliny kolem tělesa. Při proudění kapaliny podél rovné desky lze předpokládat, že tlak podél desky je konstantní a platí $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$. Stejnou podmínku můžeme předpokládat i pro

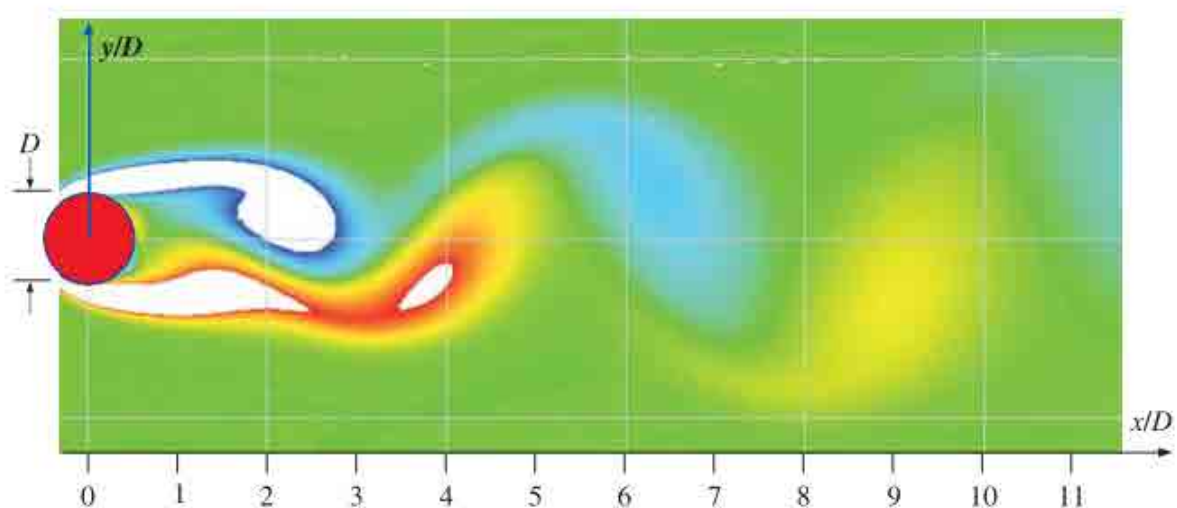
tlak v mezní vrstvě na kolmici k obtékanému povrchu je stejný, tudíž $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$. Rozdílná situace

nastává, pokud proud kapaliny obtéká zaoblené těleso. Na povrchu tělesa se mění tlak, a vzhledem k platnosti Bernoulliho rovnice se musí měnit i tlak. Na obrázku 1.3 je vyobrazeno proudění kolem zakřiveného tělesa.



Obrázek 1.3 Odrážení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu (převzato z [4])

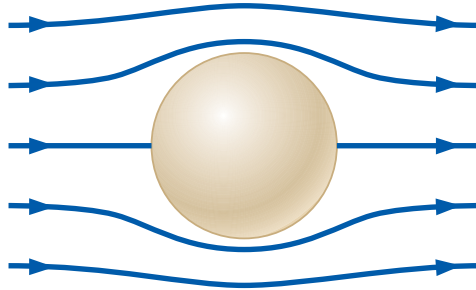
Z obrázku lze pozorovat, že se tlak zmenšuje až do bodu M, kde nastává minimální hodnota tlaku a tlak se začne zvyšovat. Odrážení mezní vrstvy nastává tehdy, když se rychlostní gradient $\frac{\partial v}{\partial x}$ začne blížit nule. To je dáno poklesem rychlosti na profilu tělesa, následným deformováním rychlostního profilu a tvorbou inflexního bodu. Na obrázku 1.3 je tento bod označen jako S. Zdali se proud odtrhne a z jakého místa se od tělesa odtrhne, rozhoduje tlakový gradient podél obtékaného tělesa a také to, o jaké proudění se jedná. Laminární proudění je náchylnější k odtržení, protože v turbulentní mezní vrstvě vzniká intenzivní výměna hybnosti mezi částicemi tekutiny i při zvýšeném tření, a proto ztrácejí částice tekutiny kinetickou energii pomaleji. Odrážení mezní vrstvy je doprovázeno tvorbou víru a úplavu [4].



Obrázek 1.4 Úplav při proudění kolem válce (převzato z [5])

1.3.3 Odpor těles

V případě, kdy těleso obtéká ideální tekutina, proudnice sledují povrch obtékaného tělesa, proudové pole je symetrické okolo svislé i vodorovné osy, a proto je odpor nulový. Tento jev se nazývá d'Alambertův paradox.



Obrázek 1.5 Obtékání tělesa ideální kapalinou (převzato z [5])

V případě skutečné tekutiny vznikají na povrchu tělesa dva druhy odporu. První druh je způsoben nesymetrickým rozložením tlaku na povrchu tělesa. Druhým druhem je odpor třecí, který je následkem nulové podmínky skluzu způsobené viskózními účinky.

Isaac Newton definoval odpor těles následující rovnicí [4]:

$$F_x = c_x S \frac{v_\infty^2}{2} \rho \quad (1.2)$$

kde

c_x - součinitel odporu [-]

S - charakteristická plocha [m²]

v_∞ - rychlost nenarušeného proudu před obtékaným tělesem [m/s]

ρ - hustota proudu tekutiny [kg/m³]

F_x - odporová síla [N]

$$F_y = c_y S \frac{v_\infty^2}{2} \rho \quad (1.3)$$

kde

c_y - součinitel vztlaku [-]

S - charakteristická plocha [m²]

v_∞ - rychlost nenarušeného proudu před obtékaným tělesem [m/s]

ρ - hustota proudu tekutiny [kg/m³]

F_y - vztlaková síla [N]

Vztlakový součinitel lze vypočítat pomocí Žukovského rovnice [4]:

$$F_y = \rho v_\infty \Gamma \quad (1.4)$$

kde

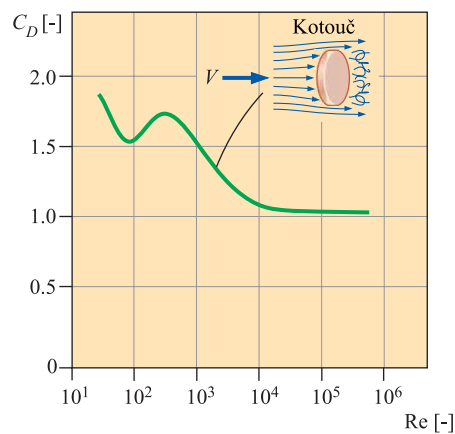
$$\Gamma = \oint_k v ds - \text{cirkulace vzduchu}$$

Při porovnání rovnice (1.4) s rovnicí (1.3) je součinitel vztlaku určen rovnicí [4]:

$$c_y = \frac{2\Gamma}{vS} \quad (1.5)$$

Součinitel odporu byl předmětem mnoha studií (zejména těch experimentálních), a díky tomu nalezneme v literatuře obrovské množství dat pro širokou škálu tvarů [5].

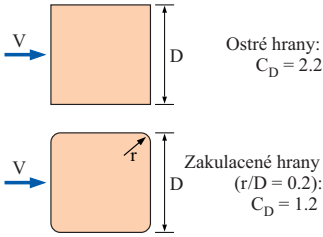
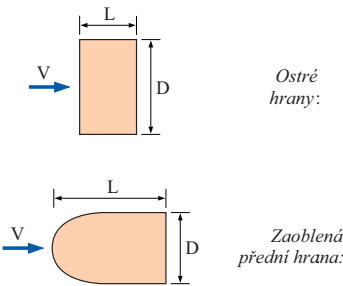
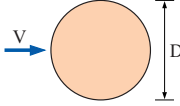
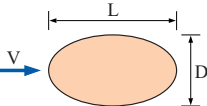
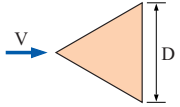
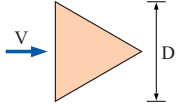
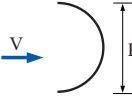
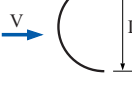
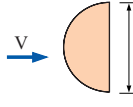
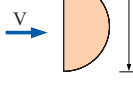
Součinitel vztlaku je obecně závislý na Reynoldsově čísle, a to zejména pro hodnoty $Re < 10^4$. Při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla je součinitel odporu v zásadě konstantní [5].



Obrázek 1.6 Koeficient odporu pro většinu těles je v podstatě konstantní pro $Re > 10^4$ (převzato z [5])

V následující tabulce jsou uvedeny vybrané dvourozměrné objekty a jejich součinitele odporu.

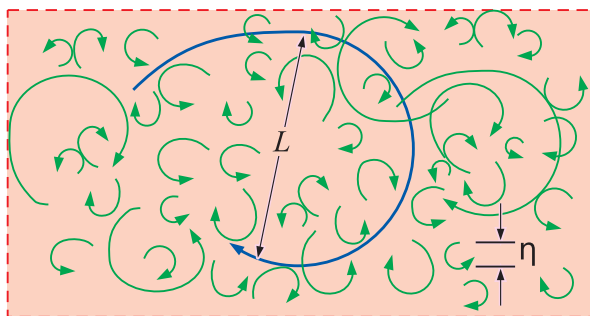
Tabulka 1.1 Součinitele odporu pro vybrané dvourozměrné tělesa pro $Re > 10^4$ (převzato z [5]).

<p>Čtvercová tyč</p>  <p>Ostré hrany: $C_D = 2.2$</p> <p>Zakulacené hrany ($r/D = 0.2$): $C_D = 1.2$</p>	<p>Obdélníková tyč</p>  <p>Ostré hrany:</p> <table border="1" data-bbox="1075 282 1310 488"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0*</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>1.7</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>1.3</td></tr> </tbody> </table> <p>* Odpovídá tenké desce</p> <p>Zaoblená přední hrana:</p> <table border="1" data-bbox="1075 546 1310 707"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5</td><td>1.2</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>0.7</td></tr> </tbody> </table>	L/D	C_D	0.0*	1.9	0.1	1.9	0.5	2.5	1.0	2.2	2.0	1.7	3.0	1.3	L/D	C_D	0.5	1.2	1.0	0.9	2.0	0.7	4.0	0.7
L/D	C_D																								
0.0*	1.9																								
0.1	1.9																								
0.5	2.5																								
1.0	2.2																								
2.0	1.7																								
3.0	1.3																								
L/D	C_D																								
0.5	1.2																								
1.0	0.9																								
2.0	0.7																								
4.0	0.7																								
<p>Kulatá tyč</p>  <p>Laminární: $C_D = 1.2$</p> <p>Turbulentní: $C_D = 0.3$</p>	<p>Eliptická tyč</p>  <table border="1" data-bbox="1038 775 1362 943"> <thead> <tr> <th rowspan="2">L/D</th> <th colspan="2">C_D</th> </tr> <tr> <th>Laminární</th> <th>Turbulentní</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>0.60</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.35</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.25</td><td>0.10</td></tr> </tbody> </table>	L/D	C_D		Laminární	Turbulentní	2	0.60	0.20	4	0.35	0.15	8	0.25	0.10										
L/D	C_D																								
	Laminární	Turbulentní																							
2	0.60	0.20																							
4	0.35	0.15																							
8	0.25	0.10																							
<p>Rovnostranná trojúhelníková tyč</p>  <p>$C_D = 1.5$</p>  <p>$C_D = 2.0$</p>	<p>Polokruhová skořepina</p>  <p>$C_D = 2.3$</p>  <p>$C_D = 1.2$</p>	<p>Polokruhová tyč</p>  <p>$C_D = 1.2$</p>  <p>$C_D = 1.7$</p>																							

2 Modelování turbulence

2.1 Krátce o turbulenci

Turbulentní proudění je jev velice běžný, neboť je součástí většiny úloh proudění kapalin. Ačkoliv se s tímto jevem setkáváme tak často, doposud zůstává z velké části neporozuměn. Je to stav kapaliny, při němž je proudění vnitřně nestabilní a při kterém vznikají fluktuace v kapalině. Řada vědeckých experimentů byla ale schopná pomocí experimentální techniky odpozorovat chování turbulentního proudění a popsat do jisté míry jeho zákonitosti. Ukázalo se, že se v turbulentním proudění vyskytují rotační struktury, které byly pojmenovány turbulentní víry („turbulent eddies“) [6]. Charakter proudění je definován Reynoldsovým číslem. Kritická hodnota Re čísla, při které dochází ke ztrátě stability a přechází do proudění turbulentního, je 2320 pro proudění v potrubí o kruhovém průřezu. Přechod mezi režimy proudění není skokový. Proudění v intervalu, ve kterém dochází k přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním, se nazývá přechodové.



Obrázek 2.1 Grafické znázornění turbulentních vírů. Nejmenší turbulentní víry (η - von Karmánovo měřítko) jsou o několik řádů menší než největší víry (L) (převzato z [5])

2.2 Úvod do modelování turbulence

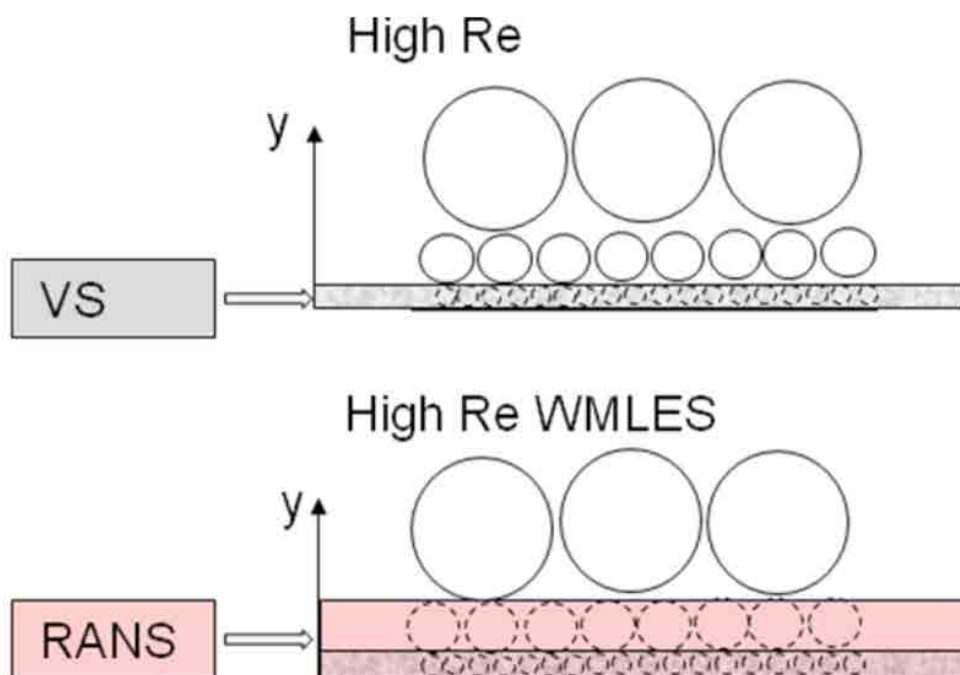
Při modelování turbulence existuje několik turbulentních modelů, které lze využít. V následující podkapitolách jsou zhruba popsány modely *Direct Numerical Simulation (DNS)* - přímá metoda simulace turbulentního proudění, *Large Eddy Simulation (LES)* - simulace velkých vírů. Model *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)* - časově průměrovaná Navier-Stokesova rovnice, je zde popsán detailněji, neboť je spjat se zadáním této bakalářské práce a je mu potřeba věnovat zvýšenou pozornost.

2.2.1 Direct Numerical Simulation (DNS)

Jak už název napovídá, jedná se o přímou metodu řešení turbulentního proudění. Při přímém řešení se počítají všechny na čase závislé fluktuace. Velikost sítě pro DNS je přesně definována pomocí Reynoldsova čísla vztahem $N^3 \geq Re^{9/4}$, kde N je počet buněk [11]. DNS tedy vyžaduje obrovské nároky na výpočetní výkon, a proto je lze využít jen v omezené míře pro jednodušší úlohy.

2.2.2 Large Eddy Simulation (LES)

Tato metoda simuluje pouze velké nestálé prvky vířivého proudu, zatímco malé disipativní víry jsou modelovány. Základní myšlenkou tohoto postupu je, že malé víry jsou izotropické. Jinak řečeno, je předpokládáno, že malé víry jsou nezávislé na orientaci souřadného systému a vždy se chovají statisticky podobně a předvídatelně, nezávisle na turbulentním poli proudění [5].



Obrázek 2.2 Princip LES (převzato z [12])

Na obrázku 2.2 lze vidět grafické znázornění funkce LES. Je patrné, že je zde simulované pouze jádro proudu s víry, které přenáší kinetickou energii. Simulace malých víru je modelována, což ve výsledku ušetří značnou část výpočetního výkonu.

2.3 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

Při metodě RANS se na rozdíl od LES nebo DNS nesnažíme vyřešit nestabilní prvky turbulentních vírů. Místo toho jsou použity matematické modely tak, aby braly v úvahu rozšířené míšení a difúzi způsobenou turbulentními víry [5].

RANS rovnice má následující znění:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (2.1)$$

kde členy \bar{u}_i a \bar{u}_j představují složky střední hodnoty rychlosti, $(-\overline{\rho u_i u_j})$ představuje tzv. Reynoldsova napětí τ_{ij} . Člen $\overline{u_i u_j}$ obsahuje šest složek napětí a lze jej napsat do tenzoru druhého řádu:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

RANS modely pracují na principu průměrování. Predikují globální charakteristiky proudění. Neudávají nám informace o malých vírových strukturách.

2.3.1 Dvourovnicový model turbulence k- ω

Dvourovnicové modely jsou součástí modelů založené na Boussinesquově hypotéze turbulentní viskozity [7]. Jedná se o jedny z dnes nejpoužívanějších modelů; patří sem všechny hlavní modely turbulence používané v praxi [6].

Při použití dvourovnicových modelů ve výpočtu vystupují dvě dodatkové diferenciální rovnice. V případě modelu k- ω se jedná o diferenciální rovnici pro turbulentní kinetickou energii k a diferenciální rovnici měrné rychlosti disipace kinetické energie turbulence ω ($\omega = \varepsilon / k$) [6].

Diferenciální (řídící) rovnice pro turbulentní kinetickou energii:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j \omega}}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \sigma^* \nu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.3)$$

Diferenciální (řídící) rovnice měrné rychlosti disipace kinetické energie:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \sigma \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2.4)$$

kde β^* , α^* , β , α , σ a σ_d jsou empirické konstanty, jejichž podrobný popis a hodnoty jsou k nalezení v knize [13].

2.3.2 Model k- ω SST (Shear Stress Transport)

Jedná se o populární modifikaci k- ω modelu. Kombinuje výhody k- ω modelu (přesnost predikcí v blízkosti stěn) a k- ε modelu (nezávislost na vlivu stěn v jádru proudu). Součástí tohoto turbulentního modelu je modifikovaná řídící rovnice měrné rychlosti disipace kinetické energie, která je počítána pomocí poměrně složitých empirických algebraických vztahů [7]. Tím se dosahuje převedení obou modelů do stejné formulace (k- ω) a pomocí směšovací (přepínací) funkce aktivuje v mezních vrstvách model k- ω , kdežto dál od stěn postupně přepíná na model k- ε [6].

Tento model má široké uplatnění zejména u navrhování lopatkových strojů, kde dochází k velkému namáhání kapaliny smykovým napětím a je nutné přesně určit bod odtržení, velikost oblasti zvíření. Jedná se například o výpočty turbín, odstředivých čerpadel apod. [7].

2.3.3 SAS (Scale-Adaptive Simulation)

Model SAS je rozšíření nestacionárního modelu RANS (URANS), který samostatně rozhoduje o tom, zda bude řešit v daných oblastech s LES kvalitou, nebo zachová základní k- ω SST model. Přepínací funkce je založena na von Kármánově rovnici pro délkové měřítko turbulence, kde se porovnává velikost vírů s velikostí von Kármánovými víry.

SAS model tedy dynamicky rozhoduje o tom, zda v daném místě výpočtové oblasti je proudění dostatečně nestabilní. Následně pak zvolí vhodný model turbulence.

Lze jej použít u proudění s velkou globální nestabilitou (odtrhávající se víry za válcem) [7].

3 Řešení

3.1 Rozbor zadání

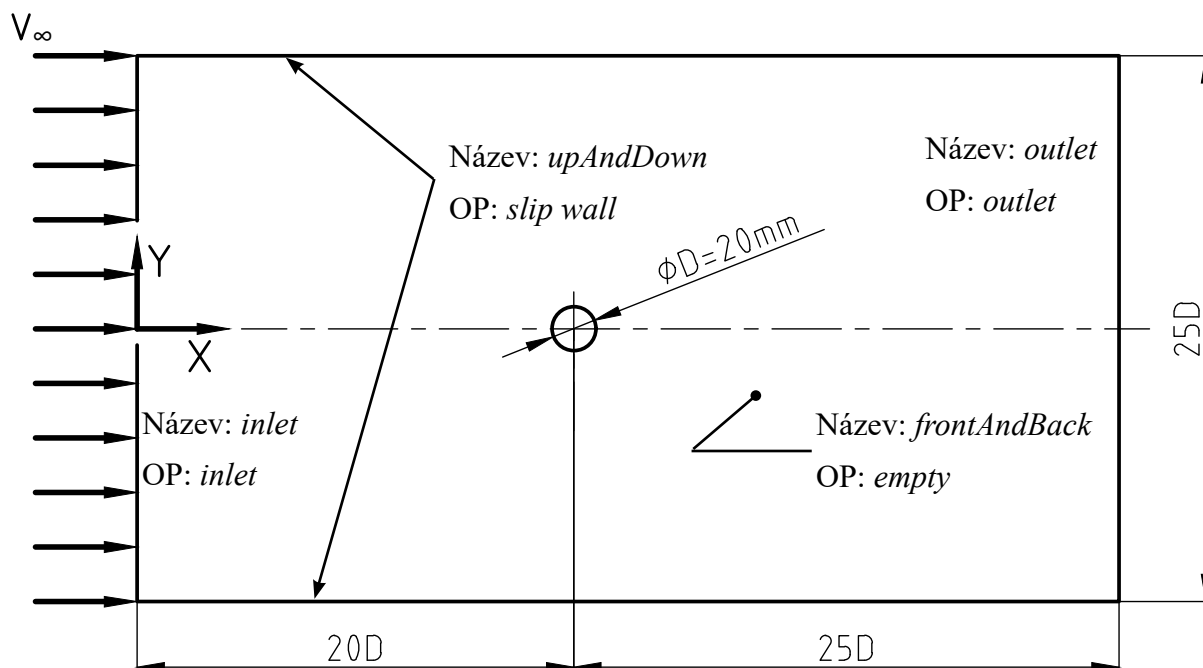
Hlavním úkolem této bakalářské práce je provést 2-D simulace proudění okolo neaerodynamického tělesa (v angličtině bluff body) - v tomto případě válce - pomocí open source CFD programu OpenFOAM.

Byly provedeny simulace pomocí $k-\omega$ SST a $k-\omega$ SST SAS modelů turbulence pro tři různá rozlišení geometrie. Výsledky těchto simulací jsou následně vyhodnoceny a porovnány spolu s výsledky simulací z [9].

3.2 Nastavení simulace

3.2.1 Výpočetní doména

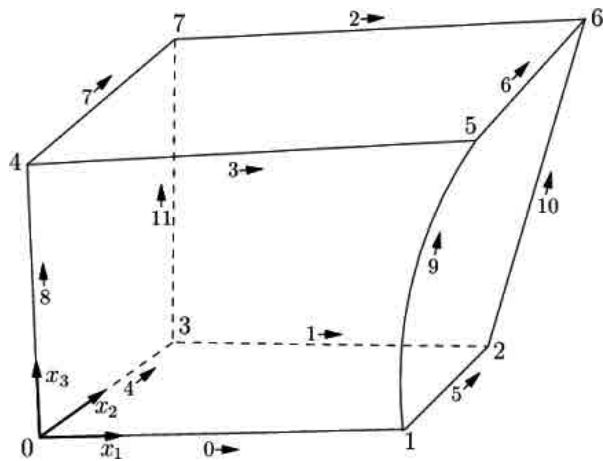
Výpočetní doména a její souřadnicový systém je uvedený na obr. 7. Velikost výpočetní domény byla zvolena tak, aby se dosáhlo minimalizování možných účinků způsobených okrajovými podmínkami okolních stěn [9].



Obrázek 3.1 Rozměry výpočetní domény

3.2.2 Geometrie

Geometrie domény byla vytvořena pomocí funkce *blockMesh*, která spočívá ve vytvoření řady bodů (vertexů) a jejich následným definováním do bloků. Souřadný systém je definován posloupností zadávaných vertexů. Osa x je definována vektorem \mathbf{x}_1 , viz obr. 8. Analogicky jsou pak definovány i zbývající osy y (vektor \mathbf{x}_2) a z (vektor \mathbf{x}_3).



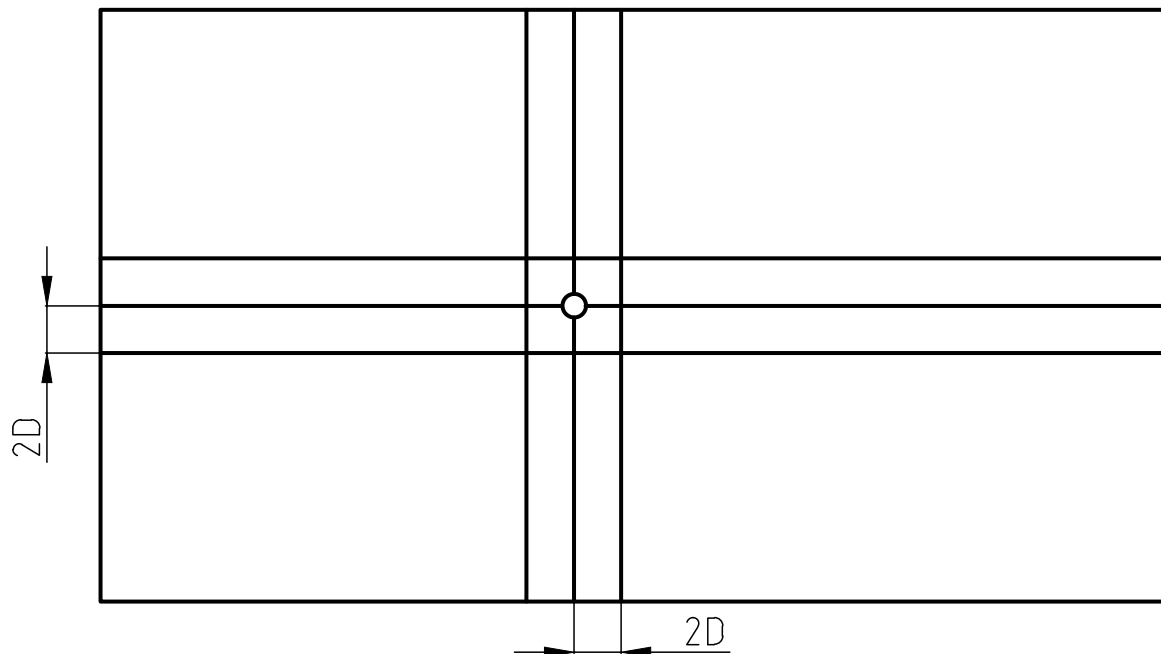
Obrázek 3.2 Jeden blok (převzato z [10])

Ačkoliv se jedná o 2-D simulaci, v softwaru OpenFOAM je vždy potřeba nadefinovat 3-D síť a vnějším plochám přiřadit okrajovou podmínku *empty*. Tento krok však není absolutně nutný, protože funkce *blockMesh* automaticky přiřadí tuto okrajovou podmínku na všechny strany, které nebyly definované.

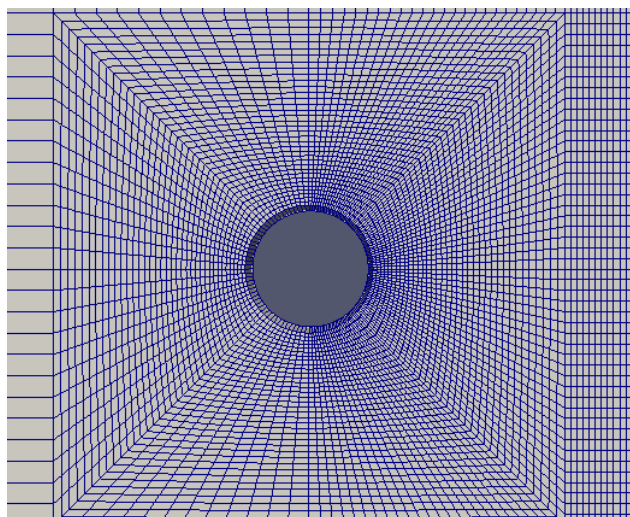
Podrobný popis funkce *blockMesh* je dostupný v publikaci [2].

Při tvorbě strukturované geometrie je důležité, aby síť byla dostatečně kvalitní. Mělo by se předcházet oblastem, kde by docházelo k náhlým změnám velikosti buněk, a taky by se mělo předcházet buňkám s vysokou šikmostí. Tyto faktory mohou vést k chybám při konvergenci nebo numerickým nepřesnostem [5].

Pro tuto úlohu byla rozvržena následující geometrie:



Obrázek 3.3 Rozvržení bloků výpočetní domény



Obrázek 3.4 Detail výpočetní sítě v oblasti válce

Tabulka 3.1 Hodnoty výpočetních sítí.

Síť	Počet buněk N	y^+
100k	107 064	$0,423 < y^+ < 5,969$
200k	190 336	$0,275 < y^+ < 4,535$
300k	297 400	$0,161 < y^+ < 4,378$

3.2.3 Fyzikální vlastnosti proudícího média

Proud vzduchu je izotermický při 20 °C, což je Newtonovská kapalina o kinematické viskozitě $1,511 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabulka 3.2 Hodnoty fyzikálních vlastností.

Kinematická viskozita vzduchu	Hustota vzduchu	Teplota vzduchu
$\nu \text{ [m}^2/\text{s]}$	$\rho \text{ [kg/m}^3]$	T [°C]
$1,511 \times 10^{-5}$	1,204	20

3.2.4 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky pro rychlost byly zvoleny následovně: pro *inlet* (přívod) byla zvolena okrajová podmínka *fixedValue*, která nám umožňuje vytvořit jednotný proud kapaliny. Hodnota rychlosti proudu byla zvolena podle 3,013 m/s ve směru x [9]. Těleso *cylinder* (válec) tvoří tzv. *no-slip* (nulová rychlost na povrchu tělesa, viz kapitola o obtékání těles) těleso a opět byla použita podmínka *fixedValue* tentokrát s hodnotou 0 m/s. Pro *outlet* (odtok) byla využita podmínka *inletOutlet* s jednotnou hodnotou 0 m/s. Stěny *upAndDown* (stěny domény) jsou koncipovány jako oblasti nenarušeného proudu, a tudíž jejich okrajové podmínky jsou *slip*.

V případě tlaku byla pro *inlet*, *upAndDown* a *cylinder* zvolena okrajová podmínka *zeroGradient*. Pro odtok byla zvolena okrajová podmínka *outletInlet* s jednotnou hodnotou $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Při modelování turbulence pomocí modelů k - ω je potřeba nadefinovat veličiny turbulentní kinetické energie k a měrnou rychlost disipace kinetické energie ω .

Turbulentní kinetická energie k byla vypočtena ze vztahu

$$k = \frac{3}{2} \cdot (UI)^2 \quad (3.1)$$

kde I je intenzita turbulence, jejíž hodnota se běžně volí mezi 0,01 až 0,05 [10]. V tomto případě byla zvolena hodnota 0,01. SI jednotka k je $[\text{J/kg}] = [\text{m}^2/\text{s}^2]$.

Měrná rychlost disipace kinetické energie je určena vztahem

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{C_\mu^{\frac{1}{4}} \cdot l} \quad (3.2)$$

kde k je turbulentní kinetická energie, C_μ je turbulentní modelová konstanta, která má hodnotu 0,09 [10]; l vyjadřuje měřítko délky turbulence, jehož hodnota je určena $l \approx 0,07L$, kde L představuje v tomto případě průměr válce. SI jednotka ω je $[\text{s}^{-1}]$.

Tabulka 3.3 Vypočtené hodnoty k a ω .

Turbulentní kinetická energie	Měrná rychlost disipace kinetické energie
k [J/kg]	ω [s ⁻¹]
$1,36172 \times 10^{-3}$	48,09288

3.2.5 Časový krok

Časový krok byl zvolen na základě Strouhalova čísla, což je bezrozměrné číslo, které udává oscilující frekvenci proudu. Je definováno jako:

$$St = \frac{f \cdot L}{v} \quad (3.3)$$

kde

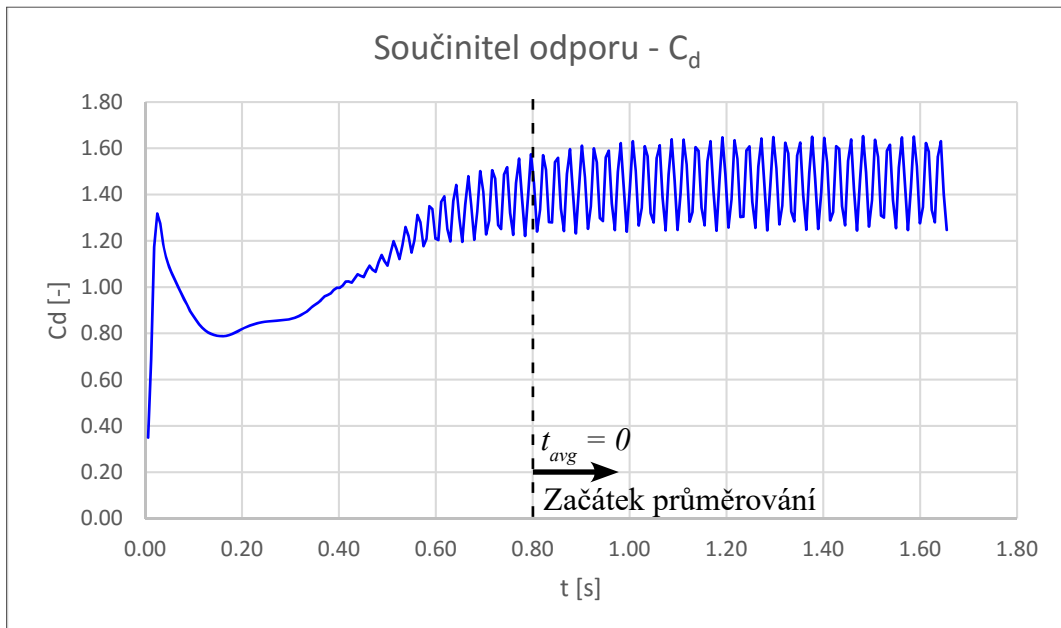
f - frekvence uvolňována vírem [Hz]

L - charakteristický rozměr [m]

v - rychlost proudění [m/s]

Pro tuto úlohu byla hodnota zvolena Strouhalova čísla 0,215 [9]. Časový krok byl dále vyvozen přepočítáním periody ze Strouhalova čísla a následným vydělením 100. Časový krok tedy činí $\Delta t = 3,087 \times 10^{-4}$ s .

Interval průměrování byl zvolen za následujícího grafu.



Obrázek 3.5 Průběh součinitele odporu pro součinitel odporu C_d u simulace $k\Omega$ $SSTAS\ 300k$

Začátek průměrování je zvolen v čase $t = 0,8$ a probíhá až do konce simulace ($t = 1,66$ s). Tento interval je zvolen tak, aby se průměroval pouze interval po ustálení proudu.

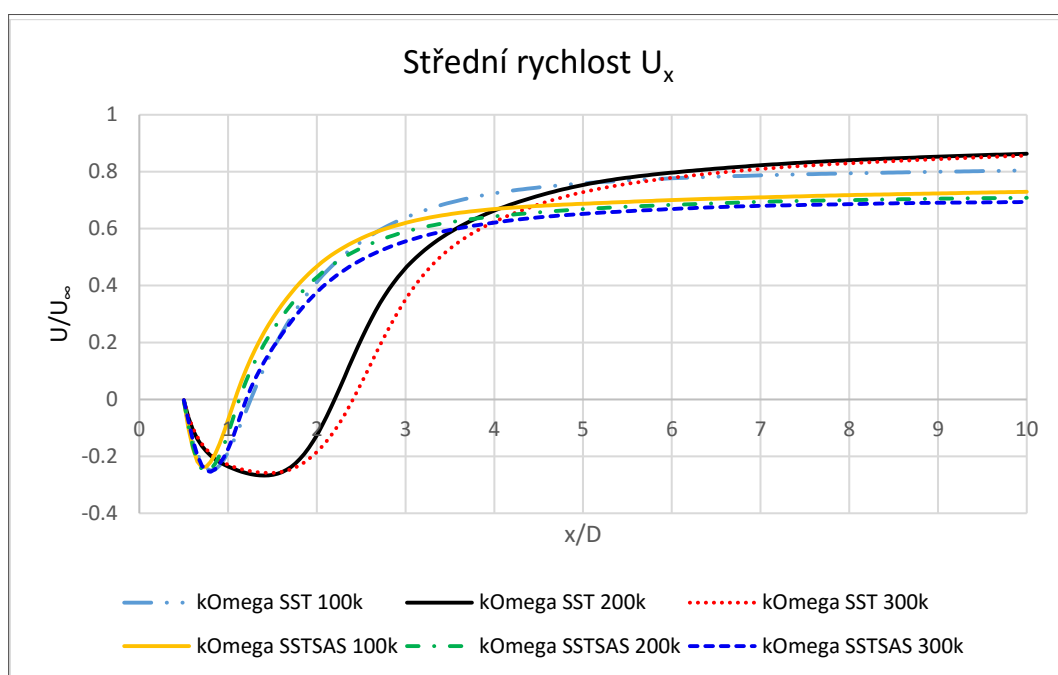
4 Analýza proudění okolo válce

4.1 Test nezávislosti řešení na výpočetní síti

Jak už bylo zmíněno v odstavci o geometrii, kvalitní geometrie je jedním z nejdůležitějších faktorů při práci s CFD. Ačkoliv může být tvorba geometrie časově náročná, je důležité, aby jsme nad ní strávili dost času, neboť kvalitní síť nám zaručí mnohem kvalitnější a spolehlivější výsledky. Z tohoto důvodu se testuje, zdali je řešení nezávislé na výpočetní síti [5].

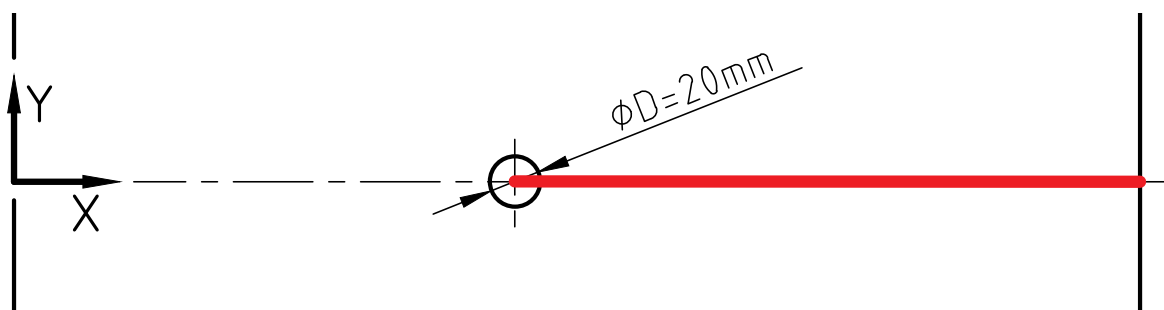
Tento test spočívá ve zvýšení počtu buněk výpočetní sítě a následným zopakováním simulace. Pokud se výsledky simulace vzájemně moc neliší, lze konstatovat, že řešení je nezávislé na výpočetní síti [5].

Pro uvedenou geometrii byly vytvořeny celkově tři sítě, viz tabulka 3.1. Pro každou síť byla provedena simulace a výsledky byly zaznamenány do následujícího grafu.



Obrázek 4.1 Porovnání všech simulací pro složku střední rychlosti U na sítích odlišné kvality

Hodnoty rychlostí uvedených na obrázku 4.1 byly vzorkovány na čáře mezi středem válce a koncem domény.

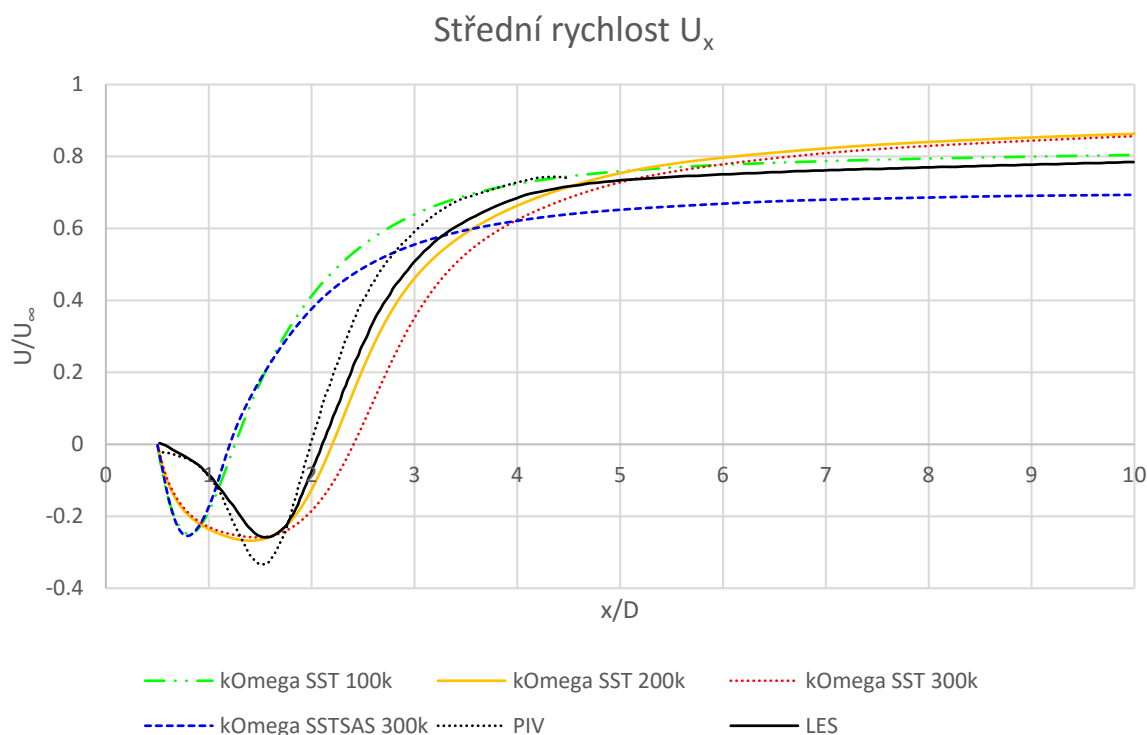


Obrázek 4.2 Oblast vzorkování U_x

Lze si všimnout, že řešení pro všechny tři sítě jsou si velmi podobná a lze tedy konstatovat, že řešení je nezávislé na výpočetní síti. Vzhledem k minimálnímu rozdílu u SSTSAS simulací bude pro zbytek práce uvažována pouze simulace SSTSAS 300k.

4.2 Střední rychlosti

Ná následných obrázcích jsou uvedeny grafy výsledných rychlostí simulace a experimentu.

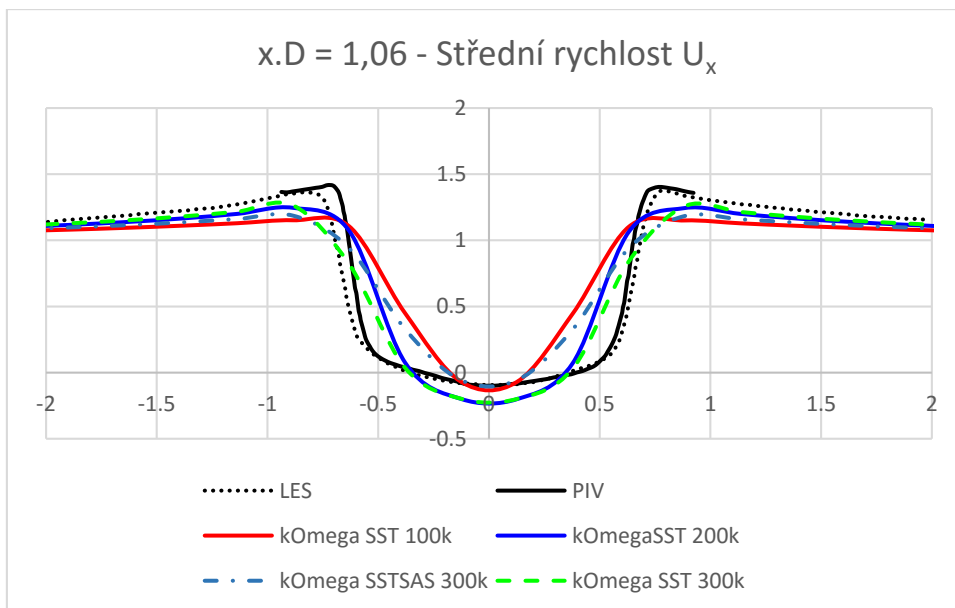


Obrázek 4.3 Srovnání výsledných středních rychlostí U_x

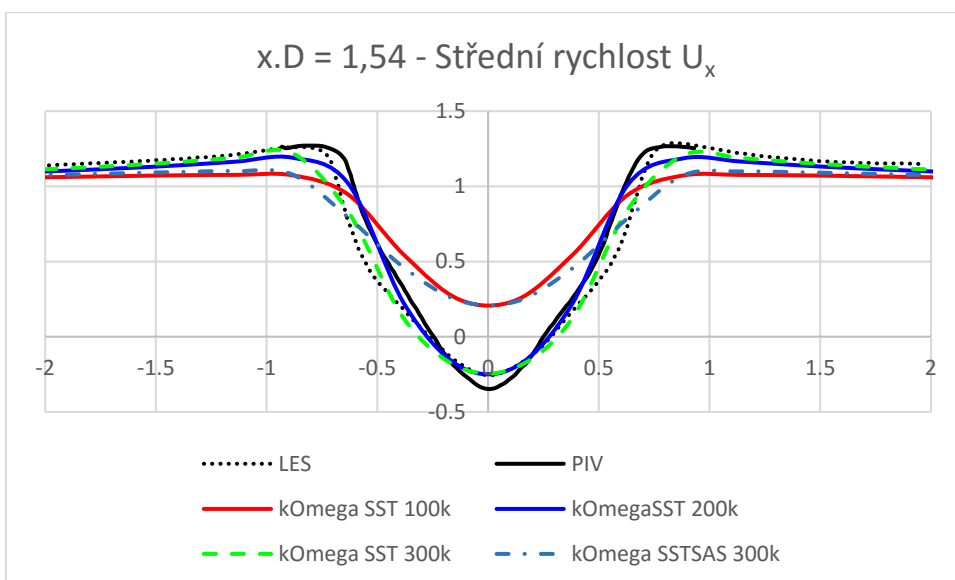
Data pro LES simulace a PIV (Particle image velocimetry - optická metoda vizualizace proudu) pochází z [9]. Tato data jsou z 3-D simulací.

Z obrázku 4.3 můžeme pozorovat, že při simulaci k- ω SST pro síť 100k a k- ω SSTSAS pro síť 300k dochází k rychlému odtržení od válce, zatímco modely k- ω SST pro sítě 200k a 300k jsou schopny predikovat tento jev přesněji a blíží se více PIV.

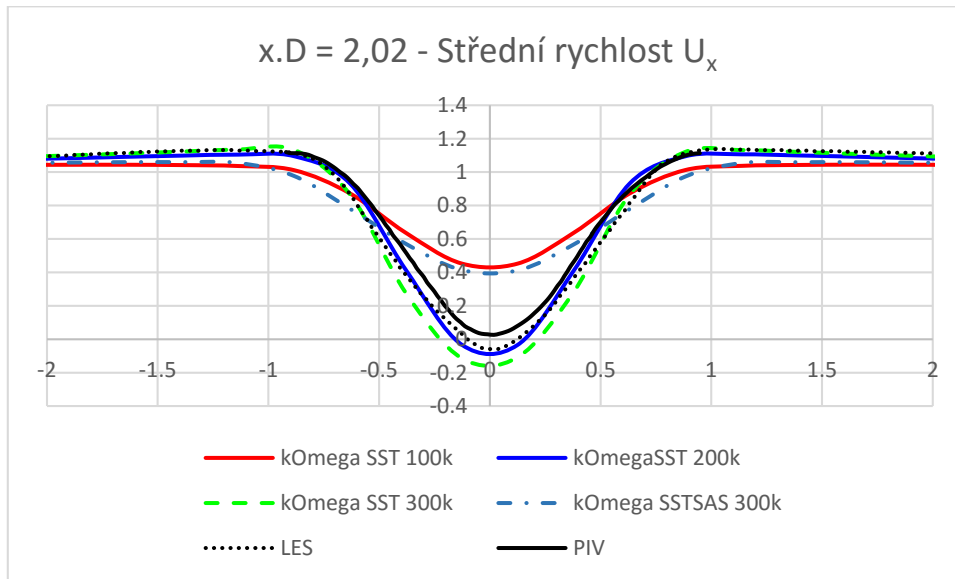
Pro další analýzu byly vytvořeny tři další svislé čáry pro vzorkování, které se nachází v oblasti za válcem ve vzdálenostech $x/D = 1,06$, $x/D = 1,54$ a $x/D = 2,02$.



Obrázek 4.4 $x.D = 1,06$ pro střední rychlost U_x

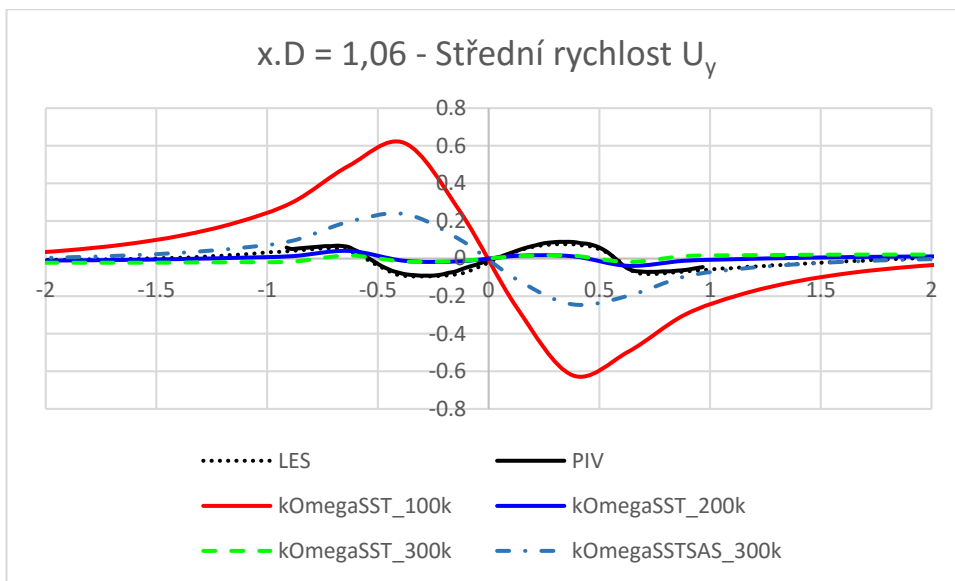


Obrázek 4.5 $x.D = 1,06$ pro střední rychlost U_x

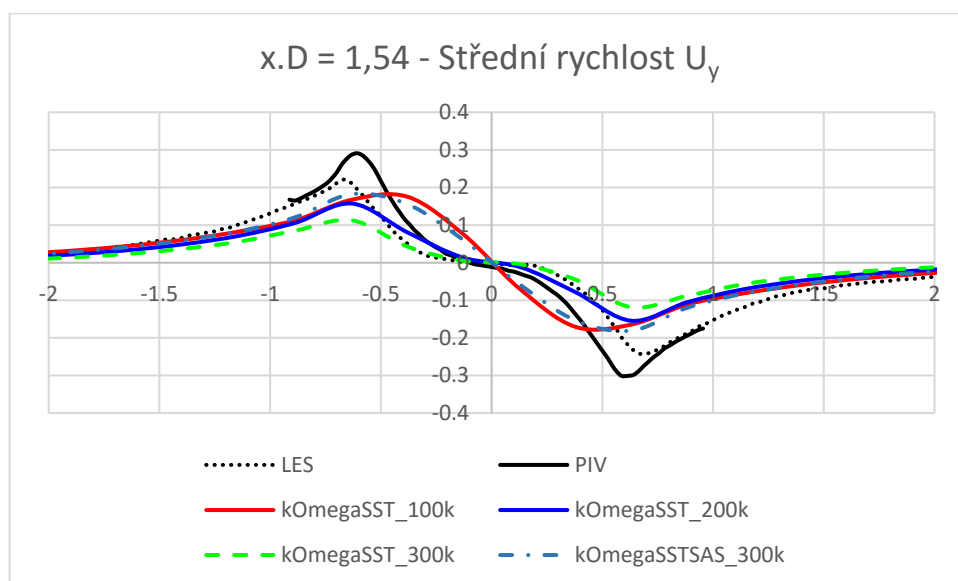


Obrázek 4.6 $x.D = 2,02$ pro střední rychlost U_x

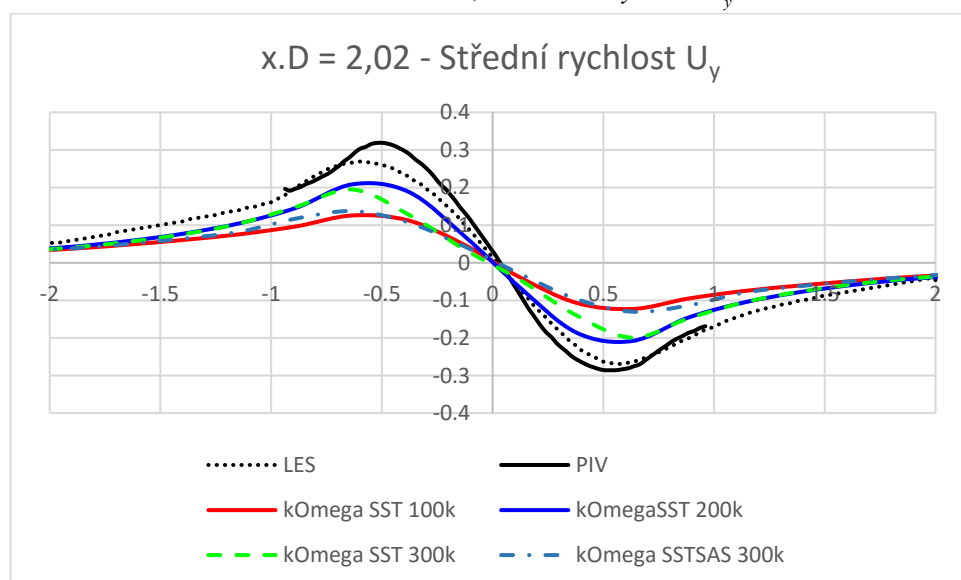
Z uvedených grafů můžeme pozorovat fakt, že některé modely nadhodnocují nebo naopak podhodnocují axiální složky rychlostí.



Obrázek 4.7 $x.D = 1,06$ - Střední rychlost U_y



Obrázek 4.8 $x.D = 1,54$ - Střední rychlost U_y



Obrázek 4.9 $x.D = 2,02$ - Střední rychlost U_y

Z těchto grafů lze názorně vidět charakteristické chování RANS modelů. V oblastech blízko válce, kde je vliv úplavu největší, se RANS modely chovají nespořádaně. Chaotické (silné proudění) RANS modely filtrují a ponechávají pouze hlavní parametry proudu. V oblastech, kde je vliv úplavu malý se naopak uklidňují.

4.3 Součinitele odporu

Průměrované součinitele odporu pro provedené simulace jsou uvedené v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1 Průměrované součinitele odporu

	Experiment	Sít'	k- ω SST	k- ω SSTSAS
C_d	0,98±0,05	100k	0,998	1,13
		200k	0,97	1,28
		300k	1,05	1,38

5 Závěr

Byly vykonány numerické simulace pro proudění kapaliny kolem válcového tělesa v 2-D prostoru. Simulace byly provedeny v open source CFD programu OpenFOAM. Jako turbulentní modely pro simulaci byly zvoleny modely $k-\omega$ SST a $k-\omega$ SSTSAS. Následně byly jejich výsledky vykresleny a porovnány s experimentem.

Z výsledku bylo vyvozeno, že 2-D simulace nefungují (nepredikují) kvalitně proudění kolem válcového tělesa. To je dáno tím, že proudění kolem válce je 3-D problém. 2-D simulace nám predikují přibližně o 1,3 % větší C_d pro SAS model. Při analyzování turbulentního proudění bylo dále zjištěno, že model $k-\omega$ SSTSAS se nedá efektivně použít pro 2-D úlohy, což je zejména dáno faktem, že byl vyvinut pro 3-D prostor. Naopak model $k-\omega$ SST se ukázal jako poměrně spolehlivý nástroj pro 2-D simulace, neboť je nám schopný dát určité míře řešení na 3-D problémy. Lze tedy konstatovat, že 2-D simulace proudění kolem válcového tělesa lze využít, pokud chceme v určité míře přesnosti znát silové působení na těleso válce.

6 Seznam použité literatury

- [1] Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. “An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method”, Longman Group Ltd., 1995
- [2] OpenFOAM User’s Guide, OpenCFD, Ltd., Bracknell, 2015
- [3] NASA - Boundary Layer. National Aeronautics and Space Administration [online]. USA: NASA, 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html>
- [4] JANALÍK, Jaroslav. Obtékání a odpor těles [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2016-05-25]. ISBN 978-80-248-1911-2. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>
- [5] ÇENGEL, Yunus A. a John M. CIMBALA. Fluid mechanics: fundamentals and applications. Third edition. New York: McGraw Hill, 2014. ISBN 978-007-3380-322.
- [6] JIŘÍ, Hájek. Modelování s využitím CFD - I. Brno, 2008. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství.
- [7] BLEJCHAŘ, Tomáš. Turbulence-Modelování proudění - CFX [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [8] Solver setup. CFD Support [online]. Praha: CFD SUPPORT [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node220.html>
- [9] SHIM, Young Min, Rajnish SHARMA a Peter RICHARDS. Numerical Study of the Flow Over a Circular Cylinder in the Near Wake at Reynolds Number 3900. 39th AIAA Fluid Dynamics Conference. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009, , 13. DOI: 10.2514/6.2009-4160. ISBN 978-1-60086-971-6. Dostupné také z: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2009-4160>
- [10] Turbulence free-stream boundary conditions. CFD Online [online]. -: CFD Online, 2014 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions
- [11] Direct numerical simulation (DNS). In: CFD Online [online]. -: CFD Online, 2012 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: [http://www.cfd-online.com/Wiki/Direct_numerical_simulation_\(DNS\)](http://www.cfd-online.com/Wiki/Direct_numerical_simulation_(DNS))
- [12] Menter, F.R. “Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD”, ANSYS Germany GmbH, 2012
- [13] WILCOX, David C. Turbulence modeling for CFD. 3rd ed. La Cãnada, Calif.: DCW Industries, c2006. ISBN 19-287-2908-8.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Mezní vrstva na desce (převzato z [4])	2
Obrázek 1.2 Rychlostní profil u laminární a turbulentní mezní vrstvy (převzato z [4])	3
Obrázek 1.3 Održení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu (převzato z [4])	4
Obrázek 1.4 Úplav při proudění kolem válce (převzato z [5])	4
Obrázek 1.5 Obtékání tělesa ideální kapalinou (převzato z [5])	5
Obrázek 1.6 Koeficient odporu pro většinu těles je v podstatě konstantní pro $Re > 10^4$ (převzato z [5])	6
Obrázek 2.1 Grafické znázornění turbulentních vírů. Nejmenší turbulentní víry (η - von Karmánovo měřítko) jsou o několik řádů menší než největší víry (L) (převzato z [5])	8
Obrázek 2.2 Princip LES (převzato z [12])	9
Obrázek 3.1 Rozměry výpočetní domény.	11
Obrázek 3.3 Rozvržení bloků výpočetní domény.	12
Obrázek 3.2 Jeden blok (převzato z [10]).	12
Obrázek 3.4 Detail výpočetní sítě v oblasti válce.	13
Obrázek 3.5 Průběh součinitele odporu pro součinitel odporu C_d u simulace kOmegaSSTAS 300k	15
Obrázek 4.2 Oblast vzorkování U_x	16
Obrázek 4.1 Porovnání všech simulací pro složku střední rychlosti U na sítích odlišné kvality	16
Obrázek 4.3 Srovnání výsledných středních rychlostí U_x	17
Obrázek 4.4 $x.D = 1,06$ pro střední rychlost U_x	18
Obrázek 4.5 $x.D = 1,06$ pro střední rychlost U_x	18
Obrázek 4.6 $x.D = 2,02$ pro střední rychlost U_x	19
Obrázek 4.7 $x.D = 1,06$ - Střední rychlost U_y	19
Obrázek 4.8 $x.D = 1,54$ - Střední rychlost U_y	20
Obrázek 4.9 $x.D = 2,02$ - Střední rychlost U_y	20

8 Seznam tabulek

Tabulka 1.1 Součinitele odporu pro vybrané dvourozměrné tělesa pro $Re > 10^4$ (převzato z [5])..	7
Tabulka 3.2 Hodnoty fyzikálních vlastností.	13
Tabulka 3.1 Hodnoty výpočetních sítí.	13
Tabulka 3.3 Vypočtené hodnoty k a ω	14
Tabulka 4.1 Průměrované součinitele odporu.	20

9 Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka		Úplné znění
CFD		Computational Fluid Dynamics
DNS		Direct Numerical Simulation
LES		Large Eddy Simulation
RANS		Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Symbol	Jednotka	Úplné znění
C_d	[-]	Součinitel odporu
C_μ	[-]	Turbulentní modelová konstanta
c_x	[-]	Součinitel odporu
c_y	[-]	Součinitel odporu
D	[m]	Průměr
F_x	[N]	Odporová síla
F_y	[N]	Odporová síla
f	[Hz]	Frekvence uvolňována vírem
I	[%]	Intenzita turbulence
k	[J/kg]	Turbulentní kinetická energie
l	[m]	Měřítko délky turbulence
L	[m]	Charakteristický rozměr
N	[-]	Počet buněk
p	[Pa]	Tlak
S	[m ²]	Plocha
t	[s]	Čas
U	[m/s]	Rychlost proudění
u	[m/s]	Rychlost proudění v horizontálním směru
v	[m/s]	Rychlost proudění ve vertikálním směru
v_∞	[m/s]	Rychlost nenarušeného proudu před tělesem
x	[m]	Horizontální vzdálenost
y	[m]	Svislá vzdálenost
ρ	[kg/m ³]	Hustota
ω	[1/s]	Měrná rychlost disipace kinetické energie
μ	[Pa.s]	Dynamická viskozita
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita
α	[-]	Emprická konstanta
α^*	[-]	Emprická konstanta
β	[-]	Emprická konstanta
β^*	[-]	Emprická konstanta
σ	[-]	Emprická konstanta
σ_d	[-]	Emprická konstanta

10 Přílohy

Příloha CD-ROM