

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



TURBULENCE MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ - CFX

učební text

Tomáš Blejchař

Ostrava 2012

Recenze: Doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D. prof. RNDr. Erika Mechlová, CSc.

Název:Turbulence-Modelování proudění - CFXAutor:Tomáš BlejchařVydání:první, 2010Počet stran:262Náklad:20

Studijní materiály pro studijní obor N2301 Strojní inženýrství fakulty strojní Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzděláváním pro konkurenceschopnost Název: Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu Číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0339 Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Tomáš Blejchař © VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2606-6

OBSAH

Ú SI	ÚVODNÍ SLOVO				
1	7	ίνι αρν τεωριε αρωιρτνί	0		
T	1 1	Režimy proudění	9 9 ۵		
	1.1 1 2	Teorie turbulence	9 10		
	1.2	Rozdělení proudění	10		
	1.5 1 4	Základní rovnice popisující proudění	13 14		
	1.4	Možnosti matematického modelování	+۱ 16		
	1.6	Reynoldsovo středování, Reynoldsovy rovnice			
2	ST	CATISTICKÉ MODELY TURBULENCE- RANS MODELY			
	2.1	Základní modely turbulence pro stacionární proudění	22		
	2.2	Reynoldsův napěťový model – Reynolds Stress Model			
3	M	ODELY TURBULENCE PRO NESTACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ	30		
4	V	ÝPOČETNÍ OBLAST	34		
	4.1	Geometrie			
	4.2	Výpočetní síť, typy výpočetní sítě	35		
	4.3	Okrajové podmínky			
5	NI	UMERICÁ SIMULACE PROUDĚNÍ V PROSTŘEDÍ ANSYS	44		
	5.1	Základní kroky numerické simulace a programy	44		
6	CI	FD SIMULACE V PROSTŘEDÍ WORKBENCH	47		
	6.1	Vytvoření projektu CFD simulace	47		
	6.2	Vytvoření geometrie	50		
	6.3	Vytvoření sítě	62		
	6.4	Vytvoření CFD simulace	70		
	6.5	Iterační řešení CFD simulace			
	6.6	Analýza výsledku	86		
7	CI	TO SIMULACE BEZ DATABÁZOVÉ PODPORY WORKBENCH	100		
	7.1	Vytvoření sítě v programu ICEM CFD			
	7.2	Příprava simulace v programu CFX			
	7.3	Vytvoření CFD simulace v prostředí Workbench s externí sítí	123		
8	PĚ	XIROZENÁ KONVEKCE V MEZEŘE S NÁHLÝM ROZŠÍŘENÍM	126		
	8.1	Modifikace projektu CFD simulace			
	8.2	Definice CFD simulace přirozené konvekce			
	8.3	Zobrazení výsledků CFD simulace přirozené konvekce	134		
	8.4	Další varianta			
9	ST	CANOVENÍ MÍSTNÍ ZTRÁTY V MEZEŘE S NÁHLÝM ROZŠÍŘENÍM	147		
	9.1	Vytvoření projektu CFD simulace s modelem k-ε	147		
	9.2	Analýza výsledků CFD simulace s modelem k-ε	151		
	9.3	Vytvoření další simulace s modelem RNG k-ε v projektu	157		
	9.4	Vytvoření simulací pro modely k-ω a SST k-ω	160		

9.5	Srovnání výsledků jednotlivých turbulentních modelů	
9.6	Definování vstupní rychlosti pomocí vzorce a tabulkou	
10 MC	DDELOVÁNÍ ROZPTYLU PEVNÝCH ČÁSTIC	
10.1	Vytvoření projektu	
10.2	Analýza výsledků	
10.3	Definice CFD simulace s pevnými částicemi se zahrnutím gravitace	
11 MC	DDELOVÁNÍ ROZPTYLU PEVNÝCH ČÁSTIC	
11.1	Modifikace projektu a definice simulace	
11.2	Analýza výsledků	
12 MC) DELOVÁNÍ PŘESTUPU TEPLA A VEDENÍ TEPLA V PEVNÉ STĚNĚ	198
12.1	Definice projektu	198
12.1 12.2	Definice projektu Definice CFD simulace s pevným tělesem	
12.1 12.2 12.3	Definice projektu Definice CFD simulace s pevným tělesem Analýza výsledků	
12.1 12.2 12.3 13 MC	Definice projektu Definice CFD simulace s pevným tělesem Analýza výsledků DDELOVÁNÍ MULTIFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ VODA-VZDUCH	
12.1 12.2 12.3 13 MC 13.1	Definice projektu Definice CFD simulace s pevným tělesem Analýza výsledků DELOVÁNÍ MULTIFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ VODA-VZDUCH Vytvoření projektu a definování multifázové CFD simulace	
12.1 12.2 12.3 13 MC 13.1 13.2	Definice projektu Definice CFD simulace s pevným tělesem Analýza výsledků DELOVÁNÍ MULTIFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ VODA-VZDUCH Vytvoření projektu a definování multifázové CFD simulace Analýza výsledků multifázové simulace	
12.1 12.2 12.3 13 MC 13.1 13.2 14 MC	Definice projektu Definice CFD simulace s pevným tělesem Analýza výsledků DDELOVÁNÍ MULTIFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ VODA-VZDUCH Vytvoření projektu a definování multifázové CFD simulace Analýza výsledků multifázové simulace DDELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V HYDRAULICKÉM VENTILU-DESIGNOVÁ S	
12.1 12.2 12.3 13 MC 13.1 13.2 14 MC 14.1	Definice projektu Definice CFD simulace s pevným tělesem Analýza výsledků DELOVÁNÍ MULTIFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ VODA-VZDUCH Vytvoření projektu a definování multifázové CFD simulace Analýza výsledků multifázové simulace DELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V HYDRAULICKÉM VENTILU-DESIGNOVÁ S Definice projektu	

POKYNY KE STUDIU

Turbulence-Modelování proudění - CFX

Pro předmět Turbulence, vyučovaný ve třetím semestru oboru Aplikovaná mechanika a Hydraulické a pneumatické stroje jste obdrželi soubor studijních materiálů.

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu
- DVD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol
- harmonogram průběhu semestru a rozvrh prezenční části
- rozdělení studentů do skupin k jednotlivým tutorům a kontakty na tutory
- kontakt na studijní oddělení

PREREKVIZITY

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětu Mechanika tekutin, Numerická matematika, Metoda konečných objemů a základy kreslení ve 3D v libovolném CAD.

CÍLEM PŘEDMĚTU

je seznámení se základními pojmy z oblasti modelování proudění a simulací CFD Po prostudování modulu by měl student být schopen samostatně vytvářet jednoduché simulace základních technických problémů z oblasti mechaniky tekutin a sdílení tepla.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do magisterského studia oborů Aplikovaná mechanika a Hydraulické a pneumatické stroje studijního programu N2301 Strojní inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



SHRNUTÍ POJMŮ

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



OTÁZKY

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



ÚLOHY K ŘEŠENÍ

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v databázové praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavní význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací hlavním cílem předmětu.



Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s touto učebnicí Vám přeje autor výukového materiálu

Tomáš Blejchař

ÚVODNÍ SLOVO

Znalost o proudění je z hlediska optimalizace daného zařízení velice důležitá. Konstrukce a vývoj nového zařízení či prvku je velice zdlouhavá a nákladná záležitost a optimalizace je většinou prováděna s ohledem na cenu, technologické možnosti výroby a parametry zařízení. Tradiční postup při konstrukci spočíval ve výrobě prototypového zařízení s několika verzemi důležitých částí. Následovalo experimentální ověření s různými kombinacemi základních dílů, na základě jehož výsledků byla vybrána optimální varianta. V poslední době se stále více uplatňují moderní numerické metody, a to jak pro výpočty deformací s použitím metody konečných prvků FEM, tak pro zjišťování proudových polí pomocí metody konečných objemů CFD. Tyto metody značně zjednodušují a urychlují proces návrhu, odpadá tak pracná a nákladná jednokusová výroba experimentálních a předsériových zařízení.

Tato skripta navazují na teorii popsanou ve skriptech *Modelování proudění - Fluent I*, proto se zde nebudeme zabývat tak důkladně základní teorií proudění a budou zde vysvětleny pouze stručné základy modelování proudění a významy jednotlivých fyzikálních parametrů daných matematických modelů. V praxi totiž uživatel nemusí znát důkladně veškerou teorii, ale musí mít povědomí o procesech, fyzikálních modelech, které jsou v daném programu implementovány. Uživatel tak musí být schopen správně zvolit matematický model a rozsah, či lépe řečeno komplexnost úlohy. V podstatě se jedná o maximální zjednodušení úlohy, tak aby byly vynechány fyzikální principy, které ovlivňují minoritně fyzikální podstatu problému. Všechny tyto předpoklady jsou aplikovány na jednoduchých příkladech, které se týkají základních úloh mechaniky tekutin. Pro řešení bude využit komerční program *Ansys/Workbench, Ansys ICEM* a *Ansys/CFX*, na které jsou tato skripta primárně zaměřena. Příklady jsou popsány v textové části

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Poznámka: označení, u něhož není uveden rozměr, reprezentuje obecnou proměnnou.

c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J/(kg⋅K)]
d_h	hydraulický průměr	[m]
8	tíhové zrychlení	[m/s ²]
h	entalpie	[J/kg]
k	turbulentní kinetická energie	[m ² /s ²]
l	délkové měřítko	[m]
М	molekulová hmotnost	[kg/kmol]
p	tlak	[Pa]
p_{op}	operační tlak	[Pa]
p_s	statický tlak	[Pa]

p_d	dynamický tlak	[Pa]
p_t	celkový (totální) tlak	[Pa]
Q_m	hmotnostní průtok	[kg/s]
q	hustota tepelného toku	[W/m ²]
r	měrná plynová konstanta	[J/(kg⋅K)]
t	čas	[S]
D	průměr, charakteristický rozměr	[m]
Ι	intenzita turbulence	[%]
Ra	Rayleighovo číslo	[1]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
S	plocha	[m ²]
Т	Termodynamická teplota	[K]
V	objem	[m ³]
<i>u</i> , <i>v</i>	rychlost	[m/s]
<i>X</i> _{<i>i</i>}	souřadnice v kartézském systému [x1, x2, x3] nebo [x, y, z]	[m]
Y	hmotnostní zlomek	[1]
β	součinitel teplotní roztažnosti	[1/K]
ε	rychlost disipace	[m ² /s ³]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W/(m⋅K)]
η	dynamická viskozita	[Pa⋅s]
ν	kinematická viskozita	[m ² /s]
ρ	hustota	[kg/m ³]
$ ho_{\it ref}$	referenční hustota	[kg/m ³]
ζ	ztrátový součinitel	[1]
ω	vířivost	[1/s]

1 ZÁKLADY TEORIE PROUDĚNÍ

1.1. REŽIMY PROUDĚNÍ



Čas ke studiu: 0.25 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat laminární a turbulentní proudění.
- popsat základní vlastnosti laminárního a turbulentního proudění.



VÝKLAD

V mechanice tekutin jsme definovali dva základní režimy proudění

1) Laminární proudění - rychlost je funkcí souřadnic x, y, z a času t, difuze je zanedbatelná, ztráty disipací jsou malé (například tlakové ztráty).

2) **Turbulentní proudění** - rychlost je náhodná funkce souřadnic x, y, z, a času t, difuze a ztráty disipací jsou mnohem větší než v prvním případě.

Hranice mezi laminárním a turbulentním proudění byla definována pomocí **Reynoldsova čísla**. Reynoldsovo číslo je definováno na základě rychlosti kapaliny, geometrických rozměrů a fyzikální vlastností kapaliny. Přesně řečeno se jedná o poměr setrvačných a viskózních sil.

Reynoldsovo číslo je definováno vztahem:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\eta} = \frac{u \cdot D}{\nu}, \ \eta = \rho \cdot \nu$$
 Rov. 1.1

kde ρ je hustota kapaliny, U je rychlost kapaliny, D charakteristický rozměr tělesa, η je dynamická viskozita kapaliny a ν je kinematická viskozita kapaliny.

První forma vzorce se využívá u stlačitelných tekutin např. vzduchu. Pokud je hustota konstantní využívá se většinou druhé definice, která je upravená pomocí vztahu mezi dynamickou a kinematickou viskozitou.



Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním byl v mechanice tekutin definován hodnotou Reynoldsova čísla $Re_k = 2320$. Tato kritická hodnota ale platí pouze pro izotermické proudění nestlačitelné tekutiny v kruhovém potrubí. Ve skutečnosti je však daná problematika daleko složitější. Přechod od laminárního k turbulentnímu proudění není jednoznačně dán a liší se případ od případu. Existují tak případy, kdy již při hodnotě Re = 3 je proudění turbulentní a naopak existují případy, kdy ještě při hodnotě Re = 8000 je proudění stále laminární. Kritická hodnota Reynoldsova čísla je tak silně závislá na daných podmínkách.

1.2. TEORIE TURBULENCE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



- Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět
 - definovat fyzikální podstatu turbulence.
 - popsat základní vlastnosti turbulentního proudění.



VÝKLAD

Turbulentní proudění obsahuje prostorové struktury, nazývané v anglosaské literatuře "eddies", tj. turbulentní víry. Tyto turbulentní víry mají různé velikosti. Velikost největších vírů tzv. **Délkové makroměřítko víru** je dáno rozměry oblasti, ve které proudí tekutina, protože v oblasti nemůže vzniknout vír, který je větší než daná oblast. Nejmenší velikost vírů tzv. **Délkové mikroměřítko víru** je dáno fyzikální vlastností tekutiny, či lépe řečeno viskozitou tekutiny. Velké víry obsahující energii se rozpadají na menší, tak dlouho, až dosáhnou minimální možné velikosti. Tento kaskádní proces je ukončen disipací energie nejmenších vírů na teplo. Turbulentní proudění je tak tvořeno víry, jejichž velikost je v rozmezí Makroměřítko-Mikroměřítko



Obr. 1.2. Kaskádní přenos energie u turbulentního proudění

Další důležitý parametr je rychlost pohybu víru/ů v, která je v teorii turbulence nazývána **Rychlostní měřítko**. Dále je ještě nutné definovat dobu "života" víru/ů. Tato doba se nazývá **Časové měřítko**. Každý vír v turbulentním proudu tekutiny je popsán prostřednictvím délkového I, rychlostního v a časového měřítka t. Prostřednictvím těchto parametrů můžeme modifikovat Reynoldsovo číslo.

$$Re = \frac{u \cdot l}{v} = \frac{u \cdot l}{v} \cdot \frac{l}{l} = \frac{\frac{l^2}{v}}{\frac{l}{u}} = \frac{t_v}{t_t}$$
Rov. 1.2

kde t_t označuje časové měřítko přenosu turbulentních vírů o makroměřítku l a t_v označuje časové měřítko molekulární difúze. Proudění můžeme charakterizovat prostřednictvím upravené formulace Reynoldsova čísla následovně jestliže

1) $t_v \langle t_t$ tj. $Re \langle 1$ laminární proudění, procesy molekulární difúze převažují a turbulentní víry zanikají.

2) $t_v \rangle t_t$ tj. $Re \rangle 1$ turbulentní proudění, turbulentní víry přetrvávají. Nerovnost je splněna pro poměrně malé hodnoty parametrů proudění, takže lze udělat závěr, že většina proudění je turbulentní.

 $3 t_v \rangle t_t$ tj. $Re \rangle 1$ plně vyvinutá turbulence znamená, že viskózní děje, které ovlivňují časové

měřítko t_v , mohou být zanedbány vzhledem k dynamice vírů, které se objevují nad hodnotou t_t . Turbulentní víry v plně vyvinutém turbulentním proudění jsou téměř neviskózní, jinak řečeno, jsou nezávislé na vlastnostech kapaliny. To se nazývá Reynoldsova podobnost.

4) $t_v \approx t_t$ tj. $Re \approx 1$ přechodový stav, laminární stacionární proudění se mění na turbulentní nestacionární, pokud je překročeno kritické Reynoldsovo číslo Re. Proudění se zpočátku stává periodické. Tato kvalitativní změna v chování proudění se nazývá bifurkace. Oscilace v proudění jsou vlastně první turbulentní víry. Při zvyšování Reynoldsova čísla se vytvářejí další nestability, až se proudění stane plně turbulentní.

Vidíme, že proudění není pouze striktně laminární a turbulentní ale ve skutečnosti existují čtyři režimy proudění. Turbulence je charakterizována několika veličinami, které určují její vlastnosti

Náhodnost

Turbulentní režim proudění se vyznačuje náhodným charakterem. Veličiny jako například rychlost u, tlak p, teplota T, atd. jsou charakterizovány v turbulentním režimu proudění zcela náhodným charakterem v závislosti na čase t a na prostorové souřadnici x, y, z. Tyto veličiny je tedy nutné chápat jako náhodné matematické veličiny a při jejich popisu je nutné použít statistické metody. Fluktuace bývají většinou o jeden řád nižší než střední hodnota, to ale není pravidlo ale pouze jakýsi hrubý odhad.

$$\frac{u'}{\overline{u}} \approx 10$$
 Rov. 1.3

Kde *u* je střední (průměrná) hodnota a u' je fluktuace (odchylka). Chování fluktuací je chaotické v čase a prostoru, takže jsou statisticky nezávislé. Pro dostatečně velký časový usek $\delta \tau$ nebo vzdálenost δx se korelační koeficient $\rho_{u'u'}(\delta t, \delta x)$ blíží k nule. Korelační koeficient je definován vztahem:

$$\rho_{u'u'}(dt, dx) = \frac{\overline{(u'(t, x) \cdot u'(t + dt, x + dx))}}{\overline{u'^2}}$$
Rov. 1.4

Jako náhodná funkce je fluktuace dobře definovatelná statistickými veličinami (spektrum, hustota pravděpodobnosti, distribuční funkce, momenty, atd.) jenž jsou obyčejné funkce prostoru x, y, z a času t.

Disipace

Turbulence je disipativní proces. Disipace je odpovědná za zvýšení přeměny kinetické energie v teplo. Je to vlastně nevratný proces, který je součástí práce viskózních napětí. Disipace (pro jednotku

hmotnosti) má rozměr m^2/s^3 , což naznačuje, že závisí pouze na délkovém měřítku l a rychlosti u. Disipace je pak definována Kolmogorovým vztahem

$$\varepsilon \approx \frac{-3}{l}$$
 Rov. 1.5

Jednoduchý vztah, který je potvrzen experimentálně, stále čeká na teoretický důkaz. Důsledkem disipace kinetické energie je změna organizovaného pohybu tekutiny na neuspořádaný pohyb molekul, resp. na teplo. Ze vztahu je také patrné, že rychlost disipace je zcela nezávislá na viskozitě kapaliny, což je jeden z paradoxů turbulence. Dále je nutné určit minimální rozměr víru/ů. Je to nejmenší možná velikost vírů před jejich úplným rozpadnutím a přeměnou na teplo. Tato minimální velikost se označuje jako Kolmogorovo mikroměřítko, které je definováno vztahem:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}$$
 Rov. 1.6

Turbulentní proudění sestává ze spojité oblasti vírových struktur, jejichž délková měřítka leží mezi délkovým makroměřítkem l a délkovým mikroměřítkem η . Fluktuace turbulentního proudu jsou tak zdrojem vazkých napětí a disipace energie. Zvyšuje se tak vnitřní energie tekutiny na úkor kinetické energie turbulence. Turbulence proto potřebuje trvalý přísun energie ke krytí těchto ztrát, jinak rychle zaniká.

Vířivost

Turbulentní proudění zahrnuje víry, které mají rotační složku rychlosti. Turbulentní proud tedy obsahuje náhodně rotující víry. Největší víry mohou mít velikost, turbulentní makroměřítko I, která nemůže být větší než charakteristický rozměr oblasti, který koresponduje s velikostí Reynoldsova čísla. Zatím co nejmenší z těchto vírů jsou limitovány viskozitou, a mají tedy velmi malý rozměr, turbulentní mikroměřítko η . Rotace vírů je úměrná jejich velikosti a v důsledku rozpadu vírů se rychlost rotace zvětšuje.

Vířivost disipačních oblastí je řádově větší než střední hodnota vířivosti v celé oblasti. Pole vířivosti je v podstatě tří-dimenzionální, s významným dynamickým vlivem.

□ Nelinearita

Turbulence je v podstatě nelineární fenomén, tato nelinearita je způsobena vlivem členu nelineárního

zrychlení $u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ v Navier-Stokesových rovnicích. Tento člen je zodpovědný za stále se zesilují

odchylky vedoucí k chaosu. Tento člen je důležitý v udržování konstantní intenzity vyvinuté turbulence. Nelineární členy jsou odpovědné za plně obsazené spektrum fluktuací (spektrum turbulence je spojité), s vzájemným působením vírů všech velikostí. Turbulence je tak defacto **bílý šum**. Z předchozího textu vyplývá, že fluktuační pohyby jsou produkovány ve vírech o makroměřítku I a disipují se v energii ve vírech o mikroměřítku η , což vede k přenosu kinetické energie z velkých víru do malých disipačních vírů (kaskádní přenos energie), a to je opět důsledek nelinearity.

Difuzní efekt turbulence

Nejdůležitější praktický jev turbulence je její schopnost značně zvýšit hodnotu toku hmoty a energie v proudovém poli. Toto zvýšení umožňuje difúze, která transportuje veličiny z objemu tekutiny do ostatních přilehlých objemů. Okamžitá konvekčně-difusní bilance zachovávající tok veličiny (hybnost, vnitřní energie, hmotnostní koncentrace, teplota atd.) je dána rovnicí:

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \cdot C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)$$

Rov. 1.8

Kde C je libovolná veličina, např. hybnost, vnitřní energie, hmotnostní koncentrace atd., k je koeficient molekulární difuze pro danou veličinu a x je prostorová souřadnice. Turbulentní proudění tak velice intenzivně homogenizuje libovolnou veličinu v dané oblasti, protože značně zvyšuje difuzní koeficient.

1.3. ROZDĚLENÍ PROUDĚNÍ





VÝKLAD

Proudění skutečných tekutin je možno rozdělit podle základních fyzikálních veličin, a to času a prostoru:



Obr. 1.3. Základní rozdělení proudění dle prostoru a času

D Rozdělení proudění podle uspořádání v prostoru

- a) Proudění třírozměrné neboli prostorové 3D veličiny, např. rychlost, jsou určeny polohou v prostoru u = u(x, y, z)
- b) Proudění dvourozměrné neboli rovinné 2D u = u(x, y)
- c) Proudění jednorozměrné 1D u = u(s) proudění po křivce s

Galerie Rozdělení proudění podle závislosti na čase

- a) Proudění ustálené (stacionární), které je nezávislé na čase $u \neq u(t)$; $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- b) Proudění neustálené (nestacionární), u něhož jsou veličiny závislé na čase u = u(x, y, z, t); u = u(s, t); u = u(t).

1.4. ZÁKLADNÍ ROVNICE POPISUJÍCÍ PROUDĚNÍ

Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní rovnice popisující nestlačitelné proudění.
- popsat jednotlivé rovnice.
- vysvětlit fyzikální podstatu rovnic.



Základní rovnice proudění vycházejí ze základních zákonů zachování. Jedná se o **zákon zachování hmoty, hybnosti a energie**. Všechny rovnice, které popisují proudění, jsou formálně stejné, protože se jedná vždy o konvekčně difuzní rovnici

Rov. 1.8. Pokud na konvekčně difuzní rovnici aplikujeme hybnost, respektive tři složky hybnosti $m \cdot (u, v, w)$ (hybnost je vektorová veličina), získáme po úpravách rovnice Navierovy – Stokesovy, které reprezentují **zákon zachování hybnosti**:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (uu)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (vu)}{\partial x} + \frac{\partial (vv)}{\partial y} + \frac{\partial (vw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad \text{Rov. 1.9}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial (wu)}{\partial x} + \frac{\partial (wv)}{\partial y} + \frac{\partial (ww)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z$$

kde U, V a W jsou složky rychlosti, t je čas, p je tlak, ρ je hustota, v je kinematická viskozita a $f_{x,y,z}$ označuje složky vnější objemové síly. Difuzní koeficient, či fyzikální vlastnost tekutiny, která ovlivňuje hybnost je u těchto rovnic kinematická viskozita. První člen představuje zrychlení tekutiny, další tři členy představují nelineární (konvektivní zrychlení), které způsobuje u vyšších Reynoldsových čísel nestabilitu rovnice a tedy náhodnost. První člen za rovnítkem představuje gradient tlaku. Poslední člen představuje smyková napětí tekutiny způsobené její viskozitou. Tato smyková napětí vyvolávají v důsledku deformaci kapaliny.

Rovnice Navierova-Stokesova byla v hydromechanice odvozena ze silové rovnováhy na element tekutiny:

10

$$\sum F = 0 \rightarrow$$

kde F_s je síla setrvačná, F_t je síla tlaková, F_o je síla objemová, F_v je síla viskózní. Zde se ale zabýváme fyzikální podstatou rovnic s ohledem na jejich matematické vyjádření, proto je rovnice popsána na základě konvekčně difuzní rovnice Rov. 1.8.

Pokud do konvekčně difuzní rovnice dosadíme za veličinu C jedničku a předpokládáme konstantní hustotu ρ , získáme rovnici kontinuity, která reprezentuje **zákon zachování hmoty**:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
 Rov. 1.11

kde U, V a W jsou složky rychlosti. Difuzní koeficient u této rovnice neexistuje. Tato rovnice vlastně představuje pouze konvektivní změnu toku hmoty. Tato změna musí být nulová, protože pokud v tekutině vytkneme libovolný objem, musí množství tekutiny, které do objemu jejím povrchem vteče v tomtéž okamžiku také vytéct. Což znamená, že změna toku je nulová.

Pokud na konvekčně difuzní rovnici aplikujeme teplotu T a při předpokladu konstantní hustoty ρ . získáme rovnici vedení tepla, která reprezentuje zákon zachování energie:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (uT)}{\partial y} + \frac{\partial (uT)}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$
$$+ 2\alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) +$$
Rov. 1.12
$$+ \alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right)$$

kde T je termodynamická teplota, t je čas, u, v a w jsou složky rychlosti, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_n}$ je teplotní

vodivost, ρ je hustota, c_n je měrná tepelná kapacita za stálého tlaku. Difuzní koeficient, či fyzikální vlastnost tekutiny, která ovlivňuje vedení tepla, je v tomto případě u této rovnice teplotní vodivost. První člen představuje akumulaci tepla v kapalině. Další tři členy představují konvekci, tedy přestup tepla v důsledku proudění kapaliny. První člen za rovnítkem představuje kondukci, tedy vedení tepla v tekutině. Poslední členy představují teplo vyvolané deformací a pohybem tekutiny. Rov. 1.9 až Rov. 1.12 jsou definovány pro nestlačitelnou tekutinu, tedy ρ = konst.

Předchozí rovnice jsou poměrně rozsáhlé a jejich zápis je zdlouhavý. Proto se velice často využívá zápis zjednodušený, který je založen na Einsteinově sumačním teorému. V zápisu se využívá indexování. Index i je striktně použit pro složku vektoru, a index j případně další podle abecedy označuje sčítací index 1,2 příp. 3 podle počtu prostorových souřadnic Podrobně je tato teorie popsána v [1]. Toto zjednodušení spočívá ve zkrácení délky rovnic a také jejich počtu.

Rovnice kontinuity se po aplikaci sumačního teorému zjednoduší následovně.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$
Rov. 1.13

Rovnice kontinuity je pouze jedna, takže je v zápisu využit pouze index j. Jelikož má rovnice tři členy jsou tyto členy na základě teorému nahrazeny sumou a indexovány.

U rovnic Navierových-Stokesových je postup obdobný. Pro každý směr souřadného systému je samostatná rovnice proto je nutné využít oba indexy i a j.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i$$
Rov. 1.14

Zde je zjednodušení zápisu patrnější, místo tří rovnic napíšeme pomocí indexu i pouze rovnici jednu a pomocí indexu j zkrátíme v rovnici členy, které se opakují.

U rovnice vedení tepla začínáme indexaci písmenem j protože rovnice je pouze jedna. Nemůžeme tedy použít index i. V posledních členech s koeficientem teplotní vodivosti se provede zjednodušení opakování členů s rychlostí, musíme tedy použít dva indexy. Jelikož je abecedně v pořadí po písmenu j písmeno k objeví se v posledním členu v indexaci i toto písmeno.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + \alpha \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)^2$$
Rov. 1.15

Tento typ zjednodušeného zápisu budeme v dalším textu používat. Soustava předchozích diferenciálních rovnic je analyticky u praktických aplikací neřešitelná, proto je nutné využívat numerické metody.

1.5. MOŽNOSTI MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ



Čas ke studiu: 1 hodina

- Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět
 - definovat metody modelování proudění.
 - popsat metody řešení turbulence.



VÝKLAD

Modelování turbulentního proudění je stále ve stádiu vývoje v souvislosti s rostoucím rozvojem v oblasti matematiky a výpočetní techniky. Samotná podstata turbulence ještě není v současné době plně vyřešeným problémem, proto je nutné vzhledem ke složitosti používat zjednodušené modely. Doposud nebyl vytvořen univerzálně platný model turbulence, naopak existuje celá řada modelů, které jsou vhodné pro určité úlohy. Vzhledem ke složitosti turbulence jsou modely založeny na empirických poznatcích. Při numerické simulaci turbulentního proudění existují tři teoreticky odlišné přístupy, které vyplývají ze zjednodušení výchozích rovnic popisujících proudění. V podstatě existují tři základní přístupy při modelování proudění:

- 1) Metoda přímé numerické simulace (DNS-Direct Numerical Simulation) je použitelná pouze za určitých omezujících předpokladů, které jsou dány velkými nároky na kapacitu počítače. Počet uzlových bodů výpočetní sítě nutných pro metodu DNS lze odhadnout řádově z Kolmogorovova mikroměřítka turbulence. Velikost výpočetního elementu musí být řádově stejná jako minimální velikost vírů před jejich disipací na teplo. Toto omezení vede k nárůstu objemu dat (požadovaná RAM) s rostoucím Reynoldsovým číslem a tedy k nereálnosti praktických výpočtů při stávající výpočetní technice. Tato metoda řeší přímo základní soustavu rovnic bez jakéhokoli zjednodušení. Řešení je tak zcela chaotické a srovnatelné s výsledky měření, i když pouze statisticky
- 2) Metoda velkých vírů (LES-Large Eddy Simulation) je založena na modelování velkých vírů, které lze zachytit výpočetní sítí. Tyto turbulentní víry jsou závislé na výpočetní oblasti, tedy jejich velikost a umístění v čase a prostoru je závislé na řešeném problému. Tyto velké víry jsou řešeny přímo defacto metodou DNS. Turbulentní víry o malých měřítcích, vyvolané kaskádním přenosem energie od velkých vírů, jsou obecně izotropní, málo se podílejí na transportních jevech, ale jejich prostřednictvím dochází k disipaci energie v důsledku viskozity. Tyto malé víry jsou parametrizovány tzv. subgridními modely a odstraněny pomocí

filtrace turbulentního pole. Volbou šířky pásma filtru, většinou odpovídajícího rozměru výpočetního elementu sítě, je možné dosáhnout takový počet buňek sítě, který lze řešit se současnou výpočetní technikou.

3) Metoda Reynoldsova časového středování Navierových –Stokesových rovnic (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) Pro většinu inženýrských úloh turbulentního proudění se využívají modely turbulence, které jsou založeny na metodě časového (Reynoldsova) středování veličin turbulentního proudění a na následující proceduře časového středování základních rovnic. Metoda vlastně spočívá v aplikaci statistických metod při řešení a zjednodušování základních rovnic.

Jelikož je metoda RANS využívána pro řešení praktických aplikací, a také v řešených příkladech, které následují, jsou využívány modely turbulence založena na této metodě, popíšeme si v následující kapitole její základy.



Obr. 1.4. Metody řešení turbulentního proudění

1.6. REYNOLDSOVO STŘEDOVÁNÍ, REYNOLDSOVY ROVNICE



Čas ke studiu: 1 hodina



- Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět
 - definovat Reynoldsovy rovnice.
 - popsat metodu časového středování.
 - vysvětlit význam turbulentní viskozity a Reynoldsových napětí.
 - vyjmenovat modely turbulence založené na RANS



VÝKLAD

Turbulentní proudění se vyznačuje náhodným charakterem. Jakákoli fyzikální veličina (rychlost, tlak, teplota, atd.) je tedy náhodnou funkcí času. Při aplikaci statistických metod je ale proudění stabilní., tj. pokud vytvoříme průměrnou hodnotu v různých časových okamžicích a z různě dlouhých časových záznamu, dostaneme vždy tutéž hodnotu. Tohoto fenoménu si povšimnul Osborn Reynolds, a navrhnul v každém okamžiku rozložit jakoukoli veličinu ς v turbulentním proudu na střední

hodnotu ς a fluktuaci ς'

$$\vec{\varphi} = \vec{\varsigma} + \varsigma' \qquad \text{Rov. 1.16}$$

Zároveň musí platit, že střední hodnota je aritmetický průměr v daném časovém úseku T a průměrná (střední) hodnota fluktuací je nulová.

$$\overline{\zeta} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \zeta dt \quad \overline{\zeta'} = 0$$
Rov. 1.17
$$\zeta = \int_{0}^{T} \frac{1}{t} \zeta dt \quad \overline{\zeta'} = 0$$
Rov. 1.17

Obr. 1.5. Znázornění veličiny, její střední hodnoty a fluktuace

Nyní si uvedeme základní pravidla o časovém průměrování, která budou aplikována na proměnné, jež lze rozložit na středovanou a fluktuační složku

$$\vec{\xi} = \vec{\zeta}, \quad \vec{\xi} + \vec{\zeta'} = \vec{\zeta} + \vec{\zeta'} = \vec{\zeta}, \quad \vec{\xi} \cdot \vec{\zeta'} = 0, \quad \vec{\zeta} + \vec{\psi} = \vec{\zeta} + \vec{\psi}, \\ \vec{\zeta} \cdot \vec{\psi} = \vec{\zeta} \cdot \vec{\psi} + \vec{\zeta'} \cdot \vec{\psi'}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\partial \vec{\zeta}}{\partial x}$$
Rov. 1.18

Nyní tato pravidla aplikujeme na rovnici kontinuity a rovnice Navierovy-Stokesovy.

Galaxie Středování rovnice kontinuity

Do rovnice kontinuity dosadíme za rychlost součet střední složky a fluktuace.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; u = \overline{u_j} + u_j^{\prime} \Rightarrow \frac{\partial (\overline{u_j} + u_j^{\prime})}{\partial x_j} = 0$$
 Rov. 1.19

Zlomek můžeme rozložit

$$\frac{\partial \left(\overline{u_j} + u_j^{\prime}\right)}{\partial x_j} = 0 \Longrightarrow \frac{\partial \left(\overline{u_j}\right)}{\partial x_j} + \frac{\partial \left(u_j^{\prime}\right)}{\partial x_j} = 0$$
 Rov. 1.20

Nyní na rovnici aplikujeme ještě jednou časové středování

$$\frac{\partial \overline{\left(u_{j}\right)}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \overline{\left(u_{j}\right)}}{\partial x_{j}} = 0$$
 Rov. 1.21

Z pravidel viz Rov. 1.18 vyplývá, že druhý zlomek bude nulový a dvojité časové středování u prvního zlomku se zjednoduší na jednoduchý časový průměr. Po těchto úpravách získáme středovanou rovnici kontinuity.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \qquad \text{Rov. 1.22}$$

Středování rovnic Navierových-Stokesových

Stejně jako u rovnice kontinuity, nahradíme všechny veličiny součtem střední hodnoty a fluktuace. Viskozitu, hustotu a vnější objemovou sílu budeme považovat za konstantní, tj. nebudeme ji rozkládat na střední hodnotu a fluktuaci.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i$$

$$u_i = \overline{u_i} + u_i'; u_j = \overline{u_j} + u_j'; p = \overline{p} + p'; f_i = \overline{f_i}$$

Provnice tedy dosadíme iednotlivé veličiny

Do rovnice tedy dosadíme jednotlivé veličiny

$$\frac{\partial \left(\overline{u_{i}}+u_{i}^{\prime}\right)}{\partial t}+\frac{\partial \left(\left(\overline{u_{i}}+u_{i}^{\prime}\right)\cdot\left(\overline{u_{j}}+u_{j}^{\prime}\right)\right)}{\partial x_{j}}=$$

$$=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \left(\overline{p}+p^{\prime}\right)}{\partial x_{i}}+\nu\frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}+u_{i}^{\prime}\right)}{\partial x_{j}^{2}}+\overline{f_{i}}$$
Rov. 1.24

Nyní jednotlivé zlomky opět rozdělíme a upravíme

$$\frac{\partial \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(u_{i}^{\prime}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\overline{u_{i}} \cdot \overline{u_{j}}\right)}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \left(\overline{u_{i}} \cdot u_{j}^{\prime}\right)}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \left(u_{i}^{\prime} \cdot \overline{u_{j}}\right)}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \left(u_{i}^{\prime} \cdot \overline{u_{j}^{\prime}}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(\overline{p}\right)}{\partial x_{i}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(p^{\prime}\right)}{\partial x_{i}} + \nu \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \nu \frac{\partial^{2} \left(u_{i}^{\prime}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \frac{\partial \left(u_{i}^{\prime} \cdot \overline{u_{j}^{\prime}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \frac{\partial \left(u_{i}^{\prime} \cdot \overline{u_{j}^{\prime}}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(p^{\prime}\right)}{\partial x_{i}} + \nu \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \nu \frac{\partial^{2} \left(u_{i}^{\prime}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \frac{\partial \left(u_{i}^{\prime} \cdot \overline{u_{j}^{\prime}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \frac$$

Nyní celou rovnici ještě jednou časově vystředujeme

$$\frac{\partial \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\overline{u_{i}} \cdot \overline{u_{j}}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(\overline{p}\right)}{\partial x_{i}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(\overline{p}\right)}{\partial x_{i}} + \nu \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \nu \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}$$

Na základě pravidel viz Rov. 1.18 odstraníme členy, které jsou nulové, čímž získáme středovanou rovnici Navierovu-Stokesovu.

$$\frac{\partial(\overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u_i} \cdot \overline{u_j})}{\partial x_j} + \frac{\partial(\overline{u_i' \cdot u_j'})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\overline{p})}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2(\overline{u_i})}{\partial x_j^2} + \overline{f_i}$$
Rov. 1.27

Středovaná rovnice kontinuity Rov. 1.22 a středované rovnice Navierovy-Stokesovy Rov. 1.27 se souhrnně nazývají **Reynoldsovy rovnice**. Jsou to tedy rovnice, které řeší středované turbulentní proudění, které již není náhodnou funkcí času. Rov. 1.27 obsahuje nový člen $\overline{u_i^{\prime} \cdot u_j^{\prime}}$, který se po vynásobení hustotou nazývá **tensor Reynoldsových napětí**. Jelikož jsou tři členy v každé rovnici, a pro 3D úlohy jsou celkem tři rovnice, obsahuje tensor devět složek.

$$\tau_{ij} = \rho \cdot \left| \frac{u' \cdot u'}{v' \cdot u'} - \frac{u' \cdot v'}{v' \cdot v'} - \frac{u' \cdot w'}{v' \cdot w'} \right|$$
Rov. 1.28

Jak již bylo řečeno tensor obsahuje devět složek, ale nezávislých je pouze šest, tj. tensor je symetrický vůči hlavní diagonále ($\overline{v' \cdot u'} = \overline{u' \cdot v'}$, atd.). Tento tensor způsobuje další dodatkové deformace kapaliny, které se vyskytují pouze u turbulentního proudění. Rovnice pro jednotlivé složky tensoru Reynoldsových napětí jsou opět formálně konvekčně-difuzní rovnice, viz

Rov. 1.8, kde proměnná *C* je složka $u_i' u_j'$. Odvození této rovnice je poměrně zdlouhavé a také samotná rovnice je i po zavedení zápisu pomocí indexů poměrně rozsáhlá.

$$\frac{\partial \overline{u_{i}'u_{j}'}}{\partial t} + \overline{u_{k}'} \frac{\partial \overline{u_{i}'u_{j}'}}{\partial x_{k}} =$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_{k}} \left[\left(\overline{u_{i}'u_{j}'u_{k}'} \right) + \frac{\overline{p'}}{\rho} \left(\delta_{kj}u_{i}' + \delta_{ik}u_{j}' \right) - v \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left(\overline{u_{i}'u_{j}'} \right) \right] -$$
Rov. 1.29
$$- \left[\overline{u_{i}'u_{k}'} \frac{\partial \overline{u_{j}}}{\partial x_{k}} + \overline{u_{j}'u_{k}'} \frac{\partial \overline{u_{i}}}{\partial x_{k}} \right] - 2v \left[\frac{\partial u_{i}'}{\partial x_{k}} \frac{\partial u_{j}'}{\partial x_{k}} \right]$$

Rovnice pro přenos tepla je středována stejným způsobem jako rovnice Navierova-Stokesova.

Reynoldsovo středování silně zjednodušilo soustavu rovnic, ale došlo k vytvoření nových proměnných. Původní soustava obtížně řešitelných pěti rovnic o pěti neznámých je tak prostřednictvím středování nahrazena pěti rovnicemi, které již lze řešit, ale neznámých je pět původních a ještě dalších šest turbulentních napětí. Problematika modelování proudění založená na RANS metodě tak vlastně spočívá ve vyjádření tensoru turbulentních napětí, respektive volbě metody výpočtu tohoto členu.



Turbulentní stacionární proudění je náhodnou funkcí času, ale je statisticky stabilní.

Laminární stacionární proudění není funkcí času.

Turbulentní vír je oblast kapaliny v turbulentním proudu, která rotuje vzhledem k hlavnímu proudu. **Turbulentní proudění** je v podstatě nelineární.

Kaskádní přenos energie představuje maření kinetické energie hlavního proudu tekutiny prostřednictvím turbulentních vírů, které se rozpadají tak dlouho až dosáhnou minimální velikosti a následně disipují v teplo.

Stacionární proudění není funkcí času.

Nestacionární proudění je funkcí času.

DNS je přímá numerická simulace.

LES je simulace velkých víru.

RANS je časové středování Navierových - Stokesových rovnic.

Základní rovnice popisující proudění jsou Navierovy-Stokesovy rovnice a rovnice kontinuity.

Časové středování je aplikace statistických metod na náhodné veličiny.

Střední hodnota je průměrná hodnota veličiny

Fluktuace je odchylka veličiny od střední hodnoty.

Reynoldsovy rovnice jsou časově středované rovnice Navierovy-Stokesovy a rovnice kontinuity.

Tensor Reynoldsových napětí způsobuje dodatkové deformace kapaliny a vyskytuje se pouze u turbulentního proudění.



OTÁZKY Č. 1

- 1. Jaké dva základní režimy proudění známe?
- 2. Jak je definováno Reynoldsovo číslo?
- 3. Jaké základní vlastnosti má turbulentní proudění?
- 4. Co představuje kaskádní přenos energie?
- 5. Co je disipace energie?
- 6. Co je mikro a makroměřítko víru?
- 7. Jaké základní zákony zachování jsou použity při popisu proudění tekutiny?
- 8. Jaké rovnice popisují proudění skutečné tekutiny?
- 9. Jakými metodami je možné řešit turbulentní proudění?
- 10. Co je časové středování?
- 11. Co jsou to Reynoldsovy rovnice?
- 12. Jak je definován tensor Reynoldsových napětí?

2 STATISTICKÉ MODELY TURBULENCE- RANS MODELY 2.1 ZÁKLADNÍ MODELY TURBULENCE PRO STACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ



Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat jednotlivé modely turbulence.
- vysvětlit základní podstatu jednotlivých modelů turbulence.



VÝKLAD

Základním problémem při výpočtu turbulentního proudění spočívá v přítomnosti Reynoldsova napětí ve středovaných Navierových - Stokesových rovnicích. Systém matematických rovnic tak není uzavřen jako u laminárního proudění. Soubor přídavných rovnic a empirických vztahů, které společně s pohybovými rovnicemi tvoří řešitelný systém rovnic, se nazývá modelem turbulence. Modely turbulence lze rozdělit do několika skupin



V dalším textu se zaměříme na modely založené na RANS přístupu, protože jsou v technické praxi využívány v 99% případů. Popis jednotlivých modelu bude dále zohledňovat specifika programu Ansys/CFX, respektive budou zde použity specifické pojmy a názvy použité v tomto programu.

Boussinesquova hypotéza

Základem celé skupiny turbulentních modelů je Boussinesquova hypotéza.

Tato hypotéza předpokládá, že podobně jako při laminárním proudění, kdy platí v zjednodušeném dvourozměrném proudění pro smykové napětí Newtonův vztah

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$
Rov. 2.1

kde τ je smykové napětí a η je dynamická viskozita.

Hypotéza tedy předpokládá, že tenzor smykových napětí je možné zaměnit Newtonovým vztahem. Jde tedy o to, že devět turbulentních napětí (šest nezávislých) je možné nahradit pouze jednou veličinou, která má stejnou jednotku jako dynamická viskozita. Tato veličina byla pojmenována **Turbulentní viskozita**.

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \tau_t = \eta_t \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}$$
 Rov. 2.2

kde τ_{ij} je tensor Reynoldsových napětí a τ_{ij} je turbulentní napětí a η_t je turbulentní viskozita. Obecně je tento předpoklad vyjádřen vztahem

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \eta_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_j' u_j'}$$

Rov. 2.3

kde k je turbulentní kinetická energie (prky na hlavní diagonále tensoru Reynoldsových napětí)

Turbulentní proudění se tak jeví jako viskóznější, tedy proudící kapalina má zdánlivě větší viskozitu než je viskozita změřená pomocí viskozimetru. Za použití této hypotézy je možné zjednodušit Reynoldsovy rovnice (středované Navierovy-Stokesovy rovnice).

$$\frac{\partial \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\overline{u_{i}} \cdot \overline{u_{j}}\right)}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \left(\overline{u_{i}' \cdot u_{j}'}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(\overline{p}\right)}{\partial x_{i}} + v \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \overline{f_{i}}$$
Bousinesquova hypotéza
$$\frac{\partial \left(\overline{u_{i}'} \cdot u_{j}'\right)}{\partial x_{j}} = v_{t} \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}}$$
Rov. 2.4
$$\frac{\partial \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\overline{u_{i}} \cdot \overline{u_{j}}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(\overline{p}\right)}{\partial x_{i}} + v \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + v_{t} \frac{\partial^{2} \left(\overline{u_{i}}\right)}{\partial x_{j}^{2}} + \overline{f_{i}}$$

kde v_t je turbulentní kinematická viskozita. Toto zjednodušení vlastně nahrazuje tenzor Reynoldsových napětí (šest neznámých), které vzniky po středování, tensorem viskózních napětí, kde jedinou neznámou je turbulentní viskozita. Důležité je si uvědomit že **turbulentní viskozita vůbec nezávisí na proudící látce, ale je vlastností režimu proudění**, a při laminárním proudění je pak rovna nule. Jelikož jsou oba tensory formálně stejné je možné je vytknou a sčítat pouze viskozitu molekulovou, která je dána fyzikální podstatou proudící látky a viskozitou turbulentní, která je vlastností proudění.

Rov. 2.7

$$\frac{\partial(\overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u_i} \cdot \overline{u_j})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\overline{p})}{\partial x_i} + (v + v_t) \frac{\partial^2(\overline{u_i})}{\partial x_j^2} + \overline{f_i}$$
 Rov. 2.5

Součet molekulové a turbulentní viskozity se označuje jako efektivní viskozita.

$$v_{eff} = v + v_t$$
 Rov. 2.6

Turbulentní modely založené na Boussinesquově hypotéze turbulentní viskozity řeší hodnotu turbulentní viskozity pomocí dodatkových rovnic. Podle počtu diferenciálních rovnic, které slouží k definici turbulentní viskozity je zvoleno základní pojmenování tohoto modelu.

- Nularovnicový model řeší turbulentní viskozitu prostřednictvím jedné algebraické rovnice
- Jednorovnicový model řeší turbulentní viskozitu prostřednictvím jedné diferenciální rovnice.
- Dvourovnicový model řeší turbulentní viskozitu prostřednictvím dvou diferenciálních rovnic.



Obr. 2.2. Přehled turbulentních modelu založených na Boussinequově hypotéze v programu *Ansys CFX* (jména modelu jsou v originále)

D Nularovnicový model -Zero Equation Model

Tento velmi jednoduchý turbulentní model je založen na výpočtu turbulentní viskozity prostřednictvím turbulentního délkového a turbulentního rychlostního měřítka.

$$\boldsymbol{\phi} \quad \boldsymbol{\eta}_t = \boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{c}_{\eta} \cdot \boldsymbol{u}_t \cdot \boldsymbol{l}_t$$

Kde ρ hustota, c_{η} je empirická konstanta, u_t je turbulentní rychlostní měřítko a l_t je turbulentní délkové měřítko. Turbulentní rychlostní měřítko je definováno jako maximální rychlost ve výpočtové

oblasti. Turbulentní délkové měřítko je definováno na základě rozměru výpočtové oblasti prostřednictvím vzorce

$$I_t = \frac{V^{\frac{1}{3}}}{7}$$
 Rov. 2.8

KdeV je objem výpočtové oblasti. Tento velice jednoduchý model má celou řadu zjednodušení, a není příliš doporučován pro technické výpočty.

Jednorovnicový model - Spalart-Allmaras a Eddy Viscosity Transport Model

Turbulentní model **Spalart-Allmaras** specifikují turbulentní viskozitu prostřednictvím jedné diferenciální rovnice pro rychlostní měřítko turbulentního pohybu $k^{\frac{1}{2}}$, což je již výše zmíněná **turbulentní kinetická energie** k [m².s⁻²]

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^{2}} + \overline{v'^{2}} + \overline{w'^{2}} \right) = \frac{1}{2} \overline{u_{j}' \cdot u_{j}'} = \frac{1}{2} \overline{u_{j}'^{2}}$$
Rov. 2.9

Pro k lze odvodit exaktní diferenciální rovnici z Navier-Stokesových rovnic. Po úpravách a zavedením empirických konstant získáme rovnici (formálně opět konvekčně-difuzní)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j}k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_t \left(\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_l} + \frac{\partial \overline{u_l}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \overline{u_l}}{\partial x_j} - c_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l_t} \qquad \text{Rov. 2.10}$$

kde σ_k a c_D jsou empirické konstanty. Samotná turbulentní viskozita je definována jednoduchým vztahem

$$v_t = c_v \cdot k^{\frac{1}{2}} \cdot l_t$$
 Rov. 2.11

kde c_v je empirická konstanta a délkové měřítko l_t je definováno stejně jako u nularovnicového modelu.

Eddy Viscosity Transport Model je velice jednoduchý turbulentní model. Na rozdíl od předchozího modelu je zde řešena diferenciální rovnice přímo pro turbulentní viskozitu v_{i}

$$\frac{\partial v_{t}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_{j}}v_{t}}{\partial x_{j}} = c_{1}v_{t}S - c_{2}\left(\frac{v_{t}}{L_{vK}}\right)^{2} + \left[\left(v + \frac{v_{t}}{\sigma}\right)\frac{\partial v}{\partial x_{j}}\right]$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u_{i}}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \overline{u_{j}}}{\partial x_{i}}\right), (L_{vK})^{2} = \left|\frac{S^{2}}{\frac{\partial S}{\partial x_{j}}\frac{\partial S}{\partial x_{j}}}\right|$$
Rov. 2.12

kde σ , c_1 , c_2 jsou empirické konstanty. S_{ij} je tensor rychlosti deformace. Tento turbulentní model je odvozen ze základního turbulentního modelu *k*- ε , který je blíže popsán v následující kapitole.

Jednorovnicové modely jsou vhodné hlavně v případech, kdy lze reálně popsat rozložení délkového měřítka l_t pomocí empirického vztahu. Jedná se zejména o případy modelů proudění v atmosféře. Tyto modely nejsou, stejně jako nularovnicový model, příliš často využívány, protože vzhledem k výkonu dnešní výpočetní techniky je možné použít komplikovanější a preciznější dvourovnicové modely.

poz. v předchozích verzích programu *Ansys CFX* (např. 10,11) nebyl jednorovnicový model Spalart-Allmaras vůbec implementován. Ve verzi 12.0 je pouze jako beta verze.

Dvourovnicový model - k-ε a RNG k-ε

Obecně řeší dvourovnicový model kromě diferenciální rovnice pro turbulentní kinetickou energii k ještě druhou diferenciální rovnici pro délkové měřítko l_t , která je u nula a jedrorovnicových modelu řešena algebraickým vztahem. Toto měřítko je předmětem transportu a historických procesů stejně jako kinetická energie k (např. víry generovány mříží jsou unášeny po proudu a jejich velikost v každém místě závisí na jejich původní velikosti). Jak již víme druhým procesem, který popisuje rozpad a zánik turbulentních vírům, je disipace. Proto tedy bude druhá diferenciální rovnice řešit **rychlost disipace** ε [m²s⁻³], proto tedy název modelu **k**- ε . Tuto rovnici je možné opět odvodit z Navierových-Stokesových rovnic. Po úpravách a zavedení empirických konstant je tedy rovnice pro rychlost disipace

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j}\varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_{\varepsilon}} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} v_t \left(\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_l} + \frac{\partial \overline{u_l}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Rov. 2.13}$$

kde $\sigma_e, c_{1\varepsilon}$ a $c_{2\varepsilon}$ jsou empirické konstanty.

Turbulentní viskozita je u dvourovnicového modelu k- ε definována vztahem, který zahrnuje jak kinetickou energii k viz Rov. 2.10 a rychlost disipace viz Rov. 2.13.

$$v_t = c_v \frac{k^2}{\varepsilon}$$
 Rov. 2.14

kde c_v je empirická konstanta. Tento turbulentní model je ověřen u úloh s vysokým Reynoldsovým číslem Re ≥ 200000 . Tento model také není vhodný pro řešení problémů při obtékání křivočarých těles, protože výsledky zcela neodpovídají prakticky ověřeným výsledkům. Jedná se zejména o bod odtržení a velikost zavíření.

Určitou modifikací modelu k- ε je model **RNG k-\varepsilon** (ReNormalization Group). Tato metoda je aplikována na Navierovy-Stokesovy rovnice a turbulentní viskozita je definována prostřednictvím iteračního procesu a odstraňuje tak úzká pásma vlnových čísel. Formálně je tento model shodný s modelem k- ε , jsou zde jiné hodnoty empirických konstant a také turbulentní viskozita je definována odlišným vztahem. Konstanta $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$ a σ_{ε} je v modelu RNG nahrazena konstantou $c_{1\varepsilon RNG}$, $c_{2\varepsilon RNG}$ respektive σ_{eRNG} . Konstanta $c_{1\varepsilon RNG}$ je počítána vztahem

$$c_{1\varepsilon RNG} = 1.42 - f_{\eta}$$

$$f_{\eta} = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4.38}\right)}{1 + \beta_{RNG} \eta^{3}}, \ \eta = \sqrt{\frac{P_{k}}{C_{\nu RNG} \varepsilon}}$$
Rov. 2.15

kde β_{RNG} , C_{vRNG} jsou empirické konstanty a P_k je produkce kinetické energie v Rov. 2.10.

Model RNG k-ɛ je možné použít všude tam, kde se v řešené oblasti vyskytuje rozsáhlá oblast se zavířením a proudění zde může být až laminární. Model však neodstraňuje základní nedostatky standardního modelu k-ɛ a přináší pouze malé zlepšení výpočtu. Obecně lze říct, že modely založené na rovnicích k-e poměrně dobře počítají plně vyvinuté turbulentní proudění volného proudu a v oblastech blízko pevné stěny přesnost modelu klesá.

Dvourovnicový model - k-ω a Shear Stress Transport k-ω

Dvourovnicový model **k-omega** řeší stejně jako model k- ε dvě dodatkové diferenciální rovnice. Rychlostní měřítko turbulence je řešeno prostřednictvím turbulentní kinetické energie k, stejně jako u předchozího modelu. Délkové měřítko turbulence je však řešeno prostřednictvím nové veličiny zvané **vířivost** [s⁻¹]. Vířivost je míra rotace kapaliny v daném bodě proudového pole. Turbulentní kinetická energie je řešena prostřednictvím rovnice

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j}k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \sigma^* \nu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$
Rov. 2.16

a vířivost je řešena následující diferenciální rovnicí

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j}\omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$
Rov. 2.17

kde β^* , σ^* , α , β a σ jsou empirické konstanty. Turbulentní viskozita je u tohoto dvourovnicového modelu určena jednoduchým vztahem

$$\frac{k}{\omega} \qquad \text{Rov. 2.18}$$

Rychlost disipace je možné v tomto modelu určit z jednoduché algebraické rovnice.

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \qquad \text{Rov. 2.19}$$

Tento turbulentní model je vhodný pro proudění s nízkými Reynoldsovými čísly Re \leq 200000, a úlohy s přechodovým režimem proudění, kde není plně vyvinutá turbulence. Nevýhoda tohoto modelu je velká citlivost na podmínky ve volném proudu (proudění ve velké vzdálenosti od stěny). Tento model tak počítá poměrně přesně proudění v blízkosti stěny, ale naopak jeho přesnost klesá ve volném proudu. Jeho přesnost je tedy opačná vzhledem k modelu k- ϵ .

Proto byl vyvinut model, který se nazývá **BSL k-\omega** (BSL Baseline) jde vlastně o kombinaci modelu k- ε a modelu k- ω . Rovnice pro rychlost disipace ε je upravena pomocí vířivosti ω . Čímž vzniká kombinovaný model. Všeobecná přesnost tohoto modelu není však taková, aby jej bylo možné použít univerzálně.

Model SST k- ω (Shear Stress Transport) je opět modifikací základního modelu k- ω . Tento turbulentní model má modifikovánu diferenciální rovnici pro vířivost. Tato rovnice pak obsahuje nový člen, který je počítán poměrně složitými empirickými algebraickými vztahy. Turbulentní model má široké uplatnění zejména u lopatkových strojů, kde dochází k velkému namáhání kapaliny smykovými napětím a je nutné přesně určit bod odtržení a velikost oblasti zavíření, jedná se například o výpočty turbín, odstředivých čerpadel apod. V jiných aplikací je přesnost tohoto modelu průměrná.

2.2. REYNOLDSŮV NAPĚŤOVÝ MODEL –REYNOLDS STRESS MODEL

V programu CFX je turbulentní model založený na RANS a Reynoldsových napětích v několika modifikacích. Pro jednoduchost si zde uvedeme pouze základní model a nikoli jeho všechny modifikace. Model Reynoldsových napětí řeší přímo šest nezávislých Reynoldsových napětí pomocí diferenciálních rovnic. Rovnic pro turbulentní napětí je celkem devět (rovnice obsahuje tři indexy a indexace začíná písmenem i), ale jak již bylo řečeno, nezávislých je pouze šest.

$$\frac{\partial \overline{u_{i}'u_{j}'}}{\partial t} + \overline{u_{k}'} \frac{\partial \overline{u_{i}'u_{j}'}}{\partial x_{k}} =$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_{k}} \left[\left(\overline{u_{i}'u_{j}'u_{k}'} \right) + \frac{\overline{p'}}{\rho} \left(\delta_{kj}u_{i}' + \delta_{ik}u_{j}' \right) - v \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left(\overline{u_{i}'u_{j}'} \right) \right] -$$

$$- \left[\overline{u_{i}'u_{k}'} \frac{\partial \overline{u_{j}}}{\partial x_{k}} + \overline{u_{j}'u_{k}} \frac{\partial \overline{u_{i}}}{\partial x_{k}} \right] - 2v \left[\frac{\partial u_{i}'}{\partial x_{k}} \frac{\partial u_{j}'}{\partial x_{k}} \right]$$
Rov. 2.20

Rovnice je opět formálně konvexně difuzní rovnice, viz

Rov. 1.8, kde proměnná *C* je složka $u_i'u_j'$ a hustota ρ je konstantní. Členy v diferenciální rovnici jsou následující: první člen je časová změna, druhý člen reprezentuje konvektivní transport. Na pravé straně rovnice první člen reprezentuje difuzní transport, další představuje redistribuci a poslední člen disipaci. Šest transportních rovnic postačuje k řešení soustavy rovnic. Model RSM je ještě doplněn o rovnici disipace Rov. 2.13. Tato rovnice zajišťuje stabilitu soustavy rovnic, která je poměrně rozsáhlá. Řešeny jsou následující rovnice: Rovnice kontinuity, tři Navierovy-Stokesovy středované rovnice, rovnice energie, šest Reynoldsových napětí a rovnice disipace. Celkem jde tedy o 12 rovnic. Model je tedy poměrně náročný na výpočetní prostředky.

RSM model existuje v celé řadě modifikací např. **Omega-Based Reynolds Stress Model**, který místo rovnice pro disipaci řeší rovnici vířivosti Rov. 2.17.

Model založený na RSM sice popisuje proudění s menším množstvím zjednodušení, ale výsledky tohoto modelu nejsou výrazně přesnější oproti modelům založeným na turbulentní viskozitě, a to při násobně delší době výpočtu. Proto se tento model využívá výjimečně, zejména pro úlohy s komplexním prostorově složitým prouděním.



Boussinesquova hypotéza zjednodušuje tensor viskózních napětí.

Turbulentní viskozita není vlastnost materiálu, ale režimu proudění.

Efektivní viskozita je součet molekulové a turbulentní viskozity.

Turbulentní model založený na turbulentní viskozitě je turbulentní model, který místo viskozity molekulové používá viskozitu efektivní a tensor Reynoldsových napětí nahrazuje turbulentní viskozitou.

Nularovnicové modely turbulence řeší turbulentní viskozitu prostřednictvím algebraické rovnice.

Jednorovnicové modely turbulence řeší turbulentní viskozitu prostřednictvím jedné diferenciální rovnice.

Dvourovnicové modely turbulence řeší turbulentní viskozitu prostřednictvím dvou diferenciálních rovnic.

Turbulentní kinetická energie představuje množství energie, která je odebrána základnímu proudu tekutiny a udržuje turbulenci v tekutině.

Rychlost disipace představuje rychlost nevratné degradace energie v teplo.

Vířivost představuje míru rotace kapaliny v turbulentním proudu.

Základní rovnice popisující proudění jsou Navierovy-Stokesovy rovnice a rovnice kontinuity.

Turbulentní model Reynoldsových napětí řeší šest diferenciálních rovnic pro jednotlivé složky tensoru Reynoldsových napětí. Model nevyužívá Boussinesquovu hypotézu turbulentní viskozity.

OTÁZKY Č. 2

- 1. Co je to Boussinesquova hypotéza?
- 2. Jak je definována turbulentní viskozita?
- 3. Co je to efektivní viskozita?
- 4. Popište nularovnicový model turbulence?
- 5. Jak je definována turbulentní kinetická energie?
- 6. Popište jednorovnicový model turbulence, co představuje tato veličina?
- 7. Jaké jednorovnicové modely známe? Jaké dodatkové rovnice řeší?
- 8. Jak je definována rychlost disipace, co představuje tato veličina?
- 9. Jak je definována vířivost, co představuje tato veličina?
- 10. Jaké základní dvourovnicové modely známe?
- 11. Popište model turbulence k-ɛ, jaké řeší rovnice, pro jaké aplikace je vhodný?
- 12. V čem se odlišuje model RNG k-ε od standardního modelu k-ε?
- 13. Popište model turbulence k-w, jaké řeší rovnice, pro jaké aplikace je vhodný?
- 14. V čem se odlišuje model SST k- ω od standardního modelu k- ω ?
- 15. V čem se odlišuje model BSL k- ω od standardního modelu k- ω ?
- 16. Pro jaké aplikace je vhodný model SST k-ω?
- 17. Popište model turbulence RSM, jaké řeší rovnice, pro jaké aplikace je vhodný?
- 18. Jaké další modifikace RSM modelu znáte, v čem se odlišují?

3 MODELY TURBULENCE PRO NESTACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat nestacionární modely turbulence.
- vysvětlit základní podstatu jednotlivých nestacionárních modelů turbulence.



VÝKLAD

V praxi existuje celá řada úloh, u kterých je nutné zahrnou ve výpočtu také nestacionární děje. Pokud je nutné v simulaci zahrnout periodické děje, malé fluktuační pohyby, či analyzovat spojité spektrum turbulence je nutné použít nestacionární modely turbulence.



Vzhledem k tomu, že problém nestacionární simulace je poměrně složitý, popíšeme si některé důležité modely, se kterými se může uživatel v praxi nejčastěji setkat. Mezi tyto modely turbulence lze zařadit:

- Unsteady Reynolds Average Navier Stokes URANS
- Large Eddy Simulation LES
- Detached Eddy Simulation DES
- Scale-Adapt Simulation SAS

Všechny tyto modely jsou časově závislé, tudíž v řešení je nutné specifikovat délku simulace. Také výsledek simulace je v každém časovém okamžiku jiný, takže výsledky je nutno analyzovat prostřednictvím animací, anebo časových průměrů za daný úsek. Vzhledem k tomu, že výše zmiňované modely přesahují základní znalosti uživatele, bude u každého modelu stručný slovní popis bez hlubší teorie a oblasti, kde je možné daný model využít.

Unsteady Reynolds Average Navier Stokes - URANS

Model URANS je založen pouze na časově závislém řešení klasického modelu RANS. Základní rovnice jsou identické s modelem RANS, pouze je zde zavedena další proměnná, a to čas. Výpočet defacto řeší nestacionární proudění jako sekvenci stabilních stavů. V modelu je tak nutné specifikovat časové měřítko, tj. čas, ve kterém se proudění příliš nemění a je možné jej považovat za stacionární. Přístup URANS je možné aplikovat bez omezení na všechny statistické modely turbulence vyjmenované v předcházející kapitole. Metodu URANS je vhodné využít v následujících případech:

- Všechny jednoduché výpočty, kde stacionární simulace nevedou k výsledku.
- Hrubé odhady periodických dějů v okolí obtékaných těles.

□ Large Eddy Simulation – LES

Model LES je založen na odlišném typu zjednodušení Navierových - Stokesových rovnic. Na rovnice je aplikován prostorový filtr, který z proudového pole odstraňuje malé víry. Tyto malé disipační víry jsou nezávislé na výpočetní oblasti, tj. jsou vždy stejné bez ohlednu na čas a prostor, jinými slovy jsou izotropní. Proto jsou tyto víry z výpočtu odfiltrovány a řešeny odlišným časově nezávislým způsobem. Velké viry, které jsou závislé na prostoru a času, jsou řešeny přímo defacto metodou DNS. Stručně řečeno je možné model LES popsat následovně: velké víry, které jsou závislé na geometrických parametrech (tvaru výpočtové oblasti), jsou řešený přímo v časově závislé formě. Malé disipační víry, které jsou izotropní (všude jsou stejné), jsou z výpočtu odfiltrovány a řešeny v časově nezávislé formě. Metoda LES je mnohem náročnější na výpočetní zdroje a také délka výpočtu je mnohonásobně delší. To je způsobeno zejména nutností počítat velice detailně proudění v blízkosti stěny. Protože metoda LES je velice citlivá právě na preciznost výpočtu v blízkosti stěny, který má zásadní vliv na vývin turbulence. Metodu LES je vhodné využít v následujících případech:

- Proudění je nestacionární, s velkým časovým měřítkem fluktuací smykové vrstvy nebo vírů.
- Proudění je nestacionární s koherentními strukturami (cyklony).
- Proudění s výraznou vztlakovou složkou, kde proudění je nestacionární (podobně jako proudění v atmosféře).
- Příklady ve kterých selhávají RANS modely, např. silně anizotropní turbulence.
- V případech, kde je nutné popsat maloměřítkové struktury jako mikrosměšování nebo chemické reakce.
- Pokud je z výpočtu nutné určit hluk, respektive kompletní spektrum hluku indikované prouděním, např. aerodynamický hluk automobilu atd.
- Ve výpočtu je nutné zahrnout fluktuační složky, např. pro výpočet rozkmitu křídla apod.
- Ve výpočtech, kde můžeme uživatel čekat na výsledek i několik týdnů při využití 8 až 16 procesorů.

Detached Eddy Simulation - DES

Model DES je založen na kombinaci klasického stacionárního modelu RANS s modelem LES. Jak již bylo řečeno, model LES je velice citlivý na kvalitu výpočtu v blízkosti stěny, což značně zvětšuje rozsah simulace (délka výpočtu a nároky na hardware). Model DES tak simuluje v blízkosti stěny proudění prostřednictvím klasického RANS přístupu stacionárně. V oblastech vzdálených od stěny je proudění simulováno přístupem LES, tedy nestacionárně. Nejvhodnější je použití modelu DES pro proudění s velkými separačními oblastmi např. odtrhávajícími se víry při vysokém Reynoldsově čísle. Metodu DES je vhodné využít v následujících případech:

- Proudění je nestacionární, s velkým časovým měřítkem fluktuací smykové vrstvy nebo vírů
- Proudění v okolí aerodynamických překážek (obtékání válce, kostky atd.)
- Proudění okolo vozidel s velkými separačními regiony (např. kamiony, autobusy, dodávky atd.)
- Proudění okolo překážek, které generují aerodynamický hluk (podvozky letadel, boční zpětná zrcátka automobilů, apod.)
- Proudění okolo křídel s periodicky se odtrhávajícími se víry.

□ Scale-Adapt Simulation – SAS

Model SAS je vylepšený nestacionární model RANS, který sám rozhoduje o tom, zda bude v dané oblasti řešit proudění stacionárně nebo nestacionárně. SAS model je založen na von Kármánově rovnici pro délkové měřítko turbulence. Na základě této rovnice lze určit, zda v daném místě výpočtové oblasti je proudění stacionární či nestacionární. SAS model tedy dynamicky rozhoduje o tom, zda bude v daném místě oblasti řešit proudění pomocí nestacionárního modelu URANS, kdy řešení je obdobné jako u modelu LES, anebo prostřednictvím stacionárního modelu RANS ve stabilních oblastech. Model SAS je tak zjednodušenou verzí modelu DES, kde místo modelu LES je použit nestacionární model RANS, který je výpočetně méně náročný než model LES. Metodu SAS je vhodné využít v následujících případech:

• Proudění s velkou globální nestabilitou. (odtrhávající se víry za válcem apod.)

Nyní si můžeme sestavit hierarchii jednotlivých nestacionárních modelů turbulence podle kvality výpočtu a náročnosti na výpočetní zdroje a čas. Pořadí bude od nejjednoduššího modelu k nejsložitějšímu a nejpreciznějšímu. Také uživatel by měl postupovat ve směru složitosti, a pokud simulace nesplňuje požadavky, je vhodné postoupit vždy o jeden model výše.

- URANS
- SAS
- DES
- LES
- DNS

Σ SHRNUTÍ POJMŮ Č. 3

URANS nestacionární řešení Reynoldsových rovnic. DES oddělená simulace turbulentních vírů SAS měřítkově adaptivní simulace. LES simulace velkých vírů.



- 1. Jak je principiálně řešen turbulentní model URANS?
- 2. Které statistické turbulentní modely je možné řešit přístupem URANS ?

- 3. Jaký je základní princip modelu LES?
- 4. Vyjmenujte výhody a nevýhody modelu LES?
- 5. Jaký je základní princip modelu DES?
- 6. Vyjmenujte výhody a nevýhody modelu DES?
- 7. Jaký je základní princip modelu SAS?
- 8. Vyjmenujte výhody a nevýhody modelu SAS?
- 9. Vyjmenujte hierarchii nestacionárních modelů turbulence podle preciznosti výpočtu?
- 10. Vyjmenujte hierarchii nestacionárních modelů turbulence dle rychlosti výpočtu a náročnosti výpočtu na HW?

4 VÝPOČETNÍ OBLAST 4.1 GEOMETRIE



Čas ke studiu: 0.25 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat pojem výpočetní geometrie.
- uvést postup při tvorbě geometrie.
- uvést příklady zjednodušování geometrie.



VÝKLAD

Geometrie oblasti představuje objem, ve kterém proudí daná tekutina. Tento objem musí být ohraničen stěnami, a to jak zanedbatelně tenkými, tak i reálnými, a dále bývá ve většině případů objem ohraničen plochami, které reprezentují vstup a výstup proudící kapaliny. Důležité je si uvědomit, že výpočtový objem vlastně představuje objem, který není součástí výkresové dokumentace. Kapalina totiž vždy vyplňuje dutiny obsažené v reálném strojním celku. Pokud tedy řešitel obdrží parametrický model vytvořený v nějakém 3D modelovacím programu (Catia, ProEngineer, Inventor, atd.) je nutné vždy geometrii upravit a defacto 3D model vyplnit (vylít), čímž vznikne inverzní 3D objem, který reprezentuje tekutinu. Zbylá vnější tělesa je pak možné z modelu ve většině případů odstranit. Pokud není k dispozici 3D parametrický model oblasti a je nutné samostatně vytvořit 3D model, je možné začít kreslit inverzní 3D objem, aniž by bylo nutné kreslit vnější reálné pevné stěny. Na následujícím obrázku je postup vytvoření geometrie



Obr. 4.1. Postup při tvorbě geometrie, příklad představuje aerodynamický výpočet karoserie vozidla.

Při vytváření geometrie je nutné také ji také předpřipravit pro následný proces síťování. Skutečný 3D model většinou obsahuje také celou řadu malých těles či zaoblení, která nejsou pro výpočet relevantní, a neúměrně by zvyšovala počet elementů potřebných pro popsání povrchu elementy. Samozřejmě že míra zjednodušení souvisí také s přesností, jaké chceme dosáhnou při výpočtu, a jak detailní model chceme vytvořit. Nyní si vyjmenujeme některé případy, na kterých si ilustrujeme možnosti zjednodušení.

1) Chceme modelovat proudění ve velkém potrubí s průměrem D = 1000 mm, potrubí je spojeno prostřednictvím přeplátování a uvnitř potrubí vyčnívají hlavy šroubů M8. je zřejmé, že hlava šroubu, ca 11mm, je zanedbatelně malá vzhledem k průměru a proudění ovlivní jen minimálně, takže je možné potrubí vytvořit jako hladké a hlavy šroubů z modelu odstranit.

2) Chceme modelovat proudění ve velkém potrubí s průměrem D = 1000 mm, potrubí je spojeno prostřednictvím přeplátováním a lepením. V potrubí tak vznikají schody o výšce tloušťky plechu. t = 5mm . Tyto výstupky jsou opět zanedbatelně malé a potrubí je možné opět modelovat jako hladké.

3) Pravoúhlé koleno v potrubí o průměru D = 1000 mm obsahuje v rohu malé zaoblení R=2 mm. Zaoblení je možné zanedbat, protože výrazně neovlivní proudění. Koleno tedy bude modelováno jako absolutně ostré.



Obr. 4.2. Příklady zjednodušování geometrie před síťováním

V definování příkladů by bylo možné dále pokračovat, např. koutové svary, prutové antény vozidel atd. Obecně však platí, že z geometrie odstraňujeme veškeré nepodstatné detaily a vykreslujeme pouze dominantní geometrické entity, které jsou v oblasti, v níž chceme modelovat proudění.

4.2 VÝPOČETNÍ SÍŤ, TYPY VÝPOČETNÍ SÍTĚ



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat pojem výpočetní síť.
- definovat jednotlivé typy elementů.
- vysvětlit pojem síťování.
- vysvětlit pojem mezní vrstva.



VÝKLAD

Pokud známe základní teorii týkající se základních rovnic a modelů turbulence, můžeme pokročit k další kapitole, která se bude týkat samotného řešení rovnic. Jak již víte ze základního kurzu matematiky, je nutné řešit diferenciální rovnice na určité oblasti. Oblast bude v našem případě objem, který bude reprezentovat proudící kapalinu a povrch objemu bude složen z ploch, které budou reprezentovat vstup, výstup kapaliny, anebo stěnu, příp. jinou kapalinu volnou hladinu apod. Tato oblast je ale spojité těleso o nekonečném počtu bodů, takže řešení by bylo nutné provést analyticky, což je pro daný systém rovnic nemožné. Proto je nutné řešit modely turbulence prostřednictvím aparátu numerické matematiky. Toto řešení vlastně nahrazuje spojité (analytické) řešení numerickým, které řeší rovnice pouze v určitých bodech, tedy diskrétně. **Metoda konečných objemů** či **CFD**

spočívá v dělení oblasti na konečné malé objemy, v jejichž středech jsou řešeny numericky diferenciální, algebraické či empirické rovnice specifické pro daný turbulentní model. Toto dělení oblasti na konečné elementy se nazývá síťování. V počátcích numerického modelování bylo nutné výpočetní síť vytvořit pomocí šestistěnů. Současnosti jsou možnosti síťování mnohem různorodější a je možné použít celou řadu elementů.



Obr. 4.3. Typy konečněprvkových elementů použitelných v programu ANSYS CFX ve 3D

Jednotlivé typy elementů se využívají podle složitosti geometrie a také podle daného typu úlohy. Samotná teorie síťování je velice obsáhlá a komplikovaná a bylo by ji možné přednášet jako samostatný předmět po dobu jednoho semestru. Vytvoření kvalitní sítě je není založeno pouze na znalostech, ale také na citu a zkušenostech řešitele, které nelze v těchto skriptech předat posluchači. Tyto znalosti je možné získat až dlouhodobým řešením reálných příkladů pod vedením zkušeného pracovníka. V numerických modelech se vyskytují dva základní typy sítí, a to:

- Strukturovaná síť
- Nestrukturovaná síť

U strukturované sítě platí pravidlo, že hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu, nelze tedy libovolně zhušťovat síť.

U **nestrukturované sítě** platí pravidlo, že jedna hranice elementu může sousedit s více hranicemi jiných elementů. Nejlépe je rozdíl patrný z následujícího obrázku



Obr. 4.4. Základní typy výpočtových sítí

Použití nestrukturované sítě je poměrně nový přístup, který umožňuje vytvořit hustou síť pouze v určitých místech. Tím je celkově snížen nárok na výpočetní zdroje, a detailně je možné řešit pouze oblasti, které jsou objektem zájmu. Další důležité dělení typu sítě je podle rozsahu použitých elementů:

- Uniformní síť
- Hybridní síť

Uniformní síť obsahuje pouze elementy stejného typu, např. kvádry atd.

Hybridní síť obsahuje elementy různých typů.

Další důležitý pojem, který je nutné uvést, je mezní vrstva.

Mezní vrstva je oblast v blízkosti pevné stěny, ve které je proudění dominantně ovlivněno viskozitou kapaliny. Jak již víme, je rychlost tekutiny na povrchu nulová, a rychlost ve velké vzdálenosti od stěny
je téměř shodná s průměrnou rychlostí. Modelování proudění v blízkosti stěny má zásadní vliv na proudění ve volném proudu. V blízkosti stěny je poměrně velký gradient rychlosti a jiných skalárních veličin, takže je v této oblasti vlivem smykových napětí produkována turbulentní kinetická energie. Tato oblast je složena ze tří vrstev podle vzdálenosti od pevné stěny. První vrstva, která sousedí přímo s pevnou stěnou, se nazývá **viskózní (laminární) podvrstva**, proudění je zde laminární a molekulární viskozita má dominantní vliv na proudění. Vnější část mezní vrstvy se označuje jako **plně turbulentní vrstva**, zde již molekulární viskozita ztratila vliv a proudění řídí turbulence. Mezi laminární podvrstvou a plně turbulentní vrstvou se vyskytuje **přechodová vrstva**, někdy označována také jako logaritmická vrstva, kde se jak viskozita, tak i turbulence uplatňují rovnocenně.



Obr. 4.5. Znázornění mezní vrstvy

Tloušťka mezní vrstvy je závislá na hodnotě Reynoldsova čísla. Stejně jako u proudění je možné u mezní vrstvy rozlišovat tři základní typy: 1) **Laminární mezní vrstvu**, 2) **Přechodovou oblast** a 3) **Turbulentní mezní vrstvu**. Tloušťku mezní vrstvy δ při obtékání tenké desky je možné určit z následujícího vztahu v závislosti na vzdálenosti *x* od **náběhového bodu**.

$$\delta = 4.9 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot x}{u \cdot \rho}}$$
 Rov. 4.1

kde x je vzdálenost od náběhové hrany, η je dynamická viskozita, ρ je hustota a u je rychlost kapaliny ve volném proudu (rychlost kapaliny v dostatečné vzdálenosti od stěny).



Náběhový bod je bod, ve kterém dochází ke kontaktu tekutiny s pevným tělesem. Nejčastěji se tento pojem uplatňuje při obtékání leteckých profilů a těles.

Tloušťku turbulentní mezní vrstvy lze odhadnout z velice jednoduchého vztahu, protože její tloušťka je již konstantní a nemění se v závislosti na vzdálenosti od náběhového bodu.

$$\delta_{turb} \approx Re^{-\frac{1}{5}}$$

Rov. 4.2

Pokud je mezní vrstva pouze laminární, tj. rychlost volného proudu je relativně malá, je možné tloušťku laminární mezní vrstvy odhadnout opět z velice jednoduchého vztahu, protože její tloušťka se nemění.

$$\delta_{lam} \approx Re^{-\frac{1}{2}}$$

Rov. 4.3

Aby bylo možné ve výpočtu zachytit vliv mezní vrstvy, je nutné elementy v blízkosti stěny zjemnit. V programech bývají implementovány specielní algoritmy pro generaci mezní vrstvy. Aby byl vliv mezní vrstvy v modelu zahrnut, je nutné mít ve vrstvě minimálně 5 elementů. Ve většině případů je při tvorbě mezní vrstvy důležitá tloušťka prvního elementu **a** a růstový faktor **q**. Růstový faktor je nárůst velikosti následujícího elementu a jedná se vlastně o geometrickou posloupnost $q = \frac{b}{a} = \frac{c}{b} = \frac{d}{c} = \frac{e}{d}$. Hodnota růstového faktoru bývá v rozmezí 1.2-1.3.



Obr. 4.7. Znázornění sítě v mezní vrstvě

Z předchozího obrázku je zřejmé, že mezní vrstva je v řezu vždy tvořena obdélníky, a to pro všechny typy elementů. Elementy u stěny jsou vždy relativně ploché, ale nikdy by však neměly překročit limitní poměr 1/100, tj. délka elementu by neměly být vetší než 100 násobek výšky první vrstvy.

Jednotlivé typy elementů jsou vhodné pro vytváření sítě v určitých případech. Síť, která je tvořena pouze kvádry, je možné vytvořit pouze v oblastech, které jsou transformovatelné na oblast složenou z kvádrů, ty mohou být i křivočaré. U prostorově složitějších oblastí, zejména u reálných úloh, je nejčastěji používána čtyřstěnná síť, která je robustnější a umožňuje pokrýt sítí téměř libovolně složitý povrch. Obecně lze tedy řici, že čtyřstěnná síť je náročnější na čas, úpravu geometrie a znalosti uživatele. Naopak čtyřstěnná síť je velice odolná, robustní, nevyžaduje žádnou rozsáhlou předpřípravu geometrie a také tvorba sítě je mnohem rychlejší.

4.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat pojem okrajová podmínka.
- vyjmenovat jednotlivé typy okrajových podmínek.
- popsat možné kombinace okrajových podmínek.



VÝKLAD

V této kapitole postoupíme k dalšímu kroku při tvorbě numerické simulace proudění. Již víme, jak jsou definovány turbulentní modely a jak vytvoříme výpočetní oblast, nyní si vysvětlíme, jak definovat plochy, které ohraničují výpočtovou oblast. Pro tyto hraniční plochy se vžil název, **okrajové**

podmínky (z anglického pojmu Boundary Conditions). V podstatě existuje pouze pět základních typů okrajových podmínek

- Vstupní okrajová podmínka
- Výstupní okrajová podmínka
- Stěnová okrajová podmínka
- Symetrická okrajová podmínka
- Periodická okrajová podmínka

U Vstupní okrajová podmínka

Vstupní okrajová podmínka "INLET" představuje plochu nebo plochy výpočtové oblasti, kterou vstupuje do oblasti tekutina. Vstupní okrajová podmínka má několik základních typů, podle veličiny, která je definována na vstupu:

- 1) Rychlost kolmá na rovinu vstupu
- 2) Rychlost definována střední hodnotou a směrovým vektorem
- 3) Rychlost definována třemi složkami (v kartézských nebo cylindrických souřadnicích)
- 4) Hmotnostní tok a směrový vektor
- 5) Dynamický tlak a směrový vektor toku tekutiny
- 6) Statický tlak a směrový vektor toku tekutiny (nedoporučuje se, numericky nestabilní)

Na vstupu je nutné také definovat turbulentní veličiny. Ty je nutné definovat vždy bez ohledu na turbulentní model. Pouze v případě použití laminárního modelu nelze definovat turbulentní veličiny. Turbulenci proudění na vstupu je možné definovat následujícími parametry:

- 1) Intenzita turbulence v %- Low 1%, Medium 5% High 10% (přednastaveno)
- 2) Intenzita turbulence a poměr turbulentní a molekulové viskozity
- 2) Hodnota turbulentní kinetické energie k a rychlosti disipace ε

3) Intenzita turbulence a délkové měřítko turbulence (za délkové měřítko se nejčastěji dosazuje hydraulický průměr vstupní oblasti)

4) Intenzita turbulence (délkové měřítko se vypočte automaticky na základě empirických vztahů)

3) Nulový gradient -toto nastavení se doporučuje pro plně vyvinuté turbulentní proudění

V případě řešení úloh s teplotou je nutné na vstupu definovat veličiny nutné pro výpočet toku tepla, definovat je možné teplotu nebo entalpii.

Výstupní okrajová podmínka

Výstupní okrajová podmínka "OUTLET" představuje plochu nebo plochy výpočtové oblasti, kterou vystupuje z oblasti tekutina. Výstupní okrajová podmínka má několik základních typů, podle veličiny, která je definována na výstupu:

1) Statický tlak (konstantní hodnota pro celou plochu)

- 2) Průměrný statický tlak (hodnota se může měnit, definována je průměr))
- 3) Rychlost kolmá na rovinu vstupu
- 4) Rychlost definována střední hodnotou a směrovým vektorem

- 5) Rychlost definována třemi složkami (v kartézských nebo cylindrických souřadnicích)
- 6) Hmotnostní tok a směrový vektor

Na výstupní okrajové podmínce se nespecifikují turbulentní parametry, také veličiny pro přenos tepla nelze specifikovát. Pokud během výpočtu nastane situace, kdy výstupní okrajová podmínka není splněna a kapalina má tendenci do výpočetní oblasti vstupovat také výstupem, je ta část, kde není splněna výstupní okrajová podmínka, nahrazena pevnou stěnou, čímž je tento tok zamezen.

Zvláštním případem výstupní okrajové podmínky je podmínka pojmenována "OPENING". Tato okrajová podmínka představuje kombinaci tlakového vstupu a tlakového výstupu. Je vhodné ji využít, pokud úloha zahrnuje volný prostor, např. zaústění komína do volné atmosféry. Tekutina touto podmínkou může tedy libovolně vstupovat i vystupovat dle nastaveného statického tlaku. U této okrajové podmínky je nutné nastavit statický tlak a parametry vnějšího prostředí, např. teplotu, turbulentní veličiny atd. Princip okrajové podmínky je následující: pokud je v těsné blízkosti okrajové podmínky jako výstup a tekutina touto plochou vytéká. Pokud je v těsné blízkosti okrajové podmínky naopak tlak nižší, než nastavený, tekutina do oblasti vstupuje, přičemž jsou použity nastavené parametry volného prostoru.

Given Stěnová okrajová podmínka

Stěnová okrajová podmínka "WALL" představuje plochu nebo plochy výpočtové oblasti, které reprezentuje pevný povrch, či plochy, kterými nemůže protékat kapalina. Tyto stěny jsou tedy dokonale nepropustné. V základě existují dva typy stěnové okrajové podmínky

- Tenká stěna (zanedbává se tloušťka pevné stěny)
- Tlustá stěna (stěna je vykreslena reálně)

Stěna je okrajová podmínka, u které kapalina ulpívá na povrchu, tedy předpokládá se, že rychlost je nulová. Na pevné stěně je možné definovat její fyzickou drsnost (pokud je drsnost zanedbatelná vzhledem rozměrům, tak se považuje stěna za ideálně hladkou), případně definovat smykové síly na povrchu.

1) Ideálně hladká stěna

- 2) Drsná stěna
- 3) Stěna bez tření (kapalina se pohybuje okolo stěny bez tření, nelpívá na ní)
- 4) Specifikované smykové napětí

Dále je na stěně, v případě řešení úloh s přestupem tepla, možné definovat parametry pro tepelný tok.

1) Teplota

2) Tepelný tok

- 3) Vnější teplota a koeficient přestupu tepla
- 4) Adiabatická stěna (dokonale izolovaná)

Stěnu je možné modelovat dvěma přístupy

- Tenká stěna
- Tlustá stěna

Tenká stěna se využívá při řešení úloh, kde tepelný tok v pevné stěně není důležitý.

Pokud požadujeme také řešit tok tepla v pevné stěně, je nutné stěnu vykreslit jako **tlustou stěnu**. Jednotlivé parametry se pak definují na základě fyzikálních parametrů. Např. teplota se definuje na

vnějším povrchu, kdežto parametry proudění na vnitřním povrchu (tření atd.). Teplota na vnitřním povrchu se vypočítá na základě přestupu tepla z pevné stěny do tekutiny, nelze ji tedy definovat. Hlavní rozdíl mezi tenkou a tlustou je ve výpočtu tepelného toku. U tenké stěny se nemůže teplo šířit podél stěny, tento přístup se tak může využít pouze v případě, že předpokládáme, že tok tepla je kolmý na stěnu. U tlusté stěny se naopak může šířit teplo ve stěně všemi směry. Takže je v pevné stěně řešena rovnice pro vedení tepla v pevném tělese (Fourierova rovnice).

Symetrická okrajová podmínka

Symetrie "SYMMETRY" je zvláštní druh stěnové okrajové podmínky, která je používána jako dělící rovina v případě, že výpočtová oblast obsahuje jednu nebo více rovin symetrie. V tom případě není nutné řešit celou oblast, ale pouze polovinu či čtvrtinu apod. Na této okrajové podmínce jsou všechny gradienty rovny nule, a není možné na ní definovat žádnou fyzikální veličinu. Tuto okrajovou podmínku je možné využít pouze v případě, že jak řešená oblast, tak i proudění je symetrické vůči této rovině. Tato rovina pak defacto způsobuje zrcadlení výpočtu, které je možné také ve výsledcích zobrazit.



Obr. 4.8. Příklad použití symetrie

Deriodická okrajová podmínka

Periodické "PERIODIC INTERFACE" podmínky jsou zvláštním druhem okrajové podmínky. Tuto podmínku musí vždy tvořit identické plochy v páru. Periodické podmínky je možné s výhodou využít u úloh, kde se cyklicky opakuje proudové pole např. lopatkové stroje. Periodická podmínky může být rotační, nebo translační podle toho, o jaký typ úlohy se jedná. U této okrajové podmínky není možné také nic definovat, protože informace jsou periodicky předávány a okrajová podmínka kopíruje výpočet. U rotační periodické podmínky je nutné pouze nastavit osu rotace, ta může být asociována se základním souřadným systémem nebo součástí geometrie.



Obr. 4.9. Příklad použití periodické podmínky



Obr. 4.10. Další příklad použití periodické podmínky

□ Kombinace okrajových podmínek

Vstupní a výstupní okrajové podmínky je možné kombinovat pouze v určitých logických kombinacích, protože je nutné dodržet podmínky numerické stability. V následující tabulce jsou přehledně uvedeny základní kombinace vstupních a výstupních okrajových podmínek.

Tekutina	Vstup	Výstup
Nestlačitelná tekutina	Rychlost	Statický tlak
$\rho = konst.$		(outlet nebo opening)
	Statický tlak, (opening)	Statický tlak, (outlet)
	Totální (celkový) tlak	Statický tlak
		(outlet nebo opening)
	Hmotnostní tok	Statický tlak
		(outlet nebo opening)
Stlačitelná tekutina	Hmotnostní tok	Statický tlak
$\rho \neq konst.$		(outlet nebo opening)
	Totální (celkový) tlak	Statický tlak
		(outlet nebo opening)

Tab. 4.1. Kombinace okrajových podmínek

Σ

SHRNUTÍ POJMŮ Č.4

Výpočtová geometrie je oblast, která reprezentuje řešenou úlohu.

Výpočetní sít je výpočetní oblast, která je rozdělena na konečné elementy.

Strukturovaná síť je výpočetní síť, u které může na hranici sousedit pouze jeden element s druhým. **Nestrukturovaná síť** je výpočetní síť, u které může na hranici sousedit jeden element se dvěma a více.

Uniformní síť je výpočetní síť, která obsahuje pouze elementy stejného typu.

Hybridní síť je výpočetní síť, která obsahuje elementy různého typu.

Mezní vrstva je oblast v okolí pevné stěny, která je dominantně ovlivněna viskozitou tekutiny. **Okrajové podmínky** jsou stěny výpočetní oblasti, které popisují jejich vlastnosti.

Vstupní okrajová podmínka reprezentuje stěnu, kterou do výpočetní oblasti vtéká tekutina.

Výstupní okrajová podmínka reprezentuje stěnu, kterou z výpočetní oblasti odtéká tekutina.

Stěnová okrajová podmínka reprezentuje pevné stěny výpočetní oblasti.

Symetrická okrajová podmínka reprezentuje stěnu, která představuje rovinu symetrie v reálné situaci.

Periodická okrajová podmínka reprezentuje stěny výpočetní oblasti, které cyklicky opakují výpočetní oblast.



OTÁZKY Č. 4

- 1. Co je výpočetní oblast, vysvětlete pojem?
- 2. Jaký je postup při vytváření výpočetní oblasti?
- 3. Uveď te příklady zjednodušení výpočtové oblasti a důvody zjednodušení?
- 4. Co je výpočetní síť?
- 5. Jaké základní typy elementů se běžně používají?
- 6. Jakou vlastnost má strukturovaná síť?
- 7. Jakou vlastnost má ne strukturovaná síť?
- 8. Jaké elementy využívá uniformní síť?
- 9. Jaké elementy využívá hybridní síť?
- 10. Vysvětlete pojem mezní vrstva?
- 11. Vysvětlete pojem laminární podsvrstva?
- 12. Jak lze odhadnout tloušťku laminární a turbulentní mezní vrstvy?
- 13. Jak je možné zahrnout mezní vrstvu do výpočetní sítě?
- 14. Co je okrajová podmínka, vysvětlete pojem?
- 15. Jaké základní typy okrajových podmínek se využívají při simulacích?
- 16. Jaké možnosti jsou při definování vstupní okrajové podmínky?
- 17. Jaké možnosti jsou při definování výstupní okrajové podmínky?
- 18. Jak je definována tenká a tlustá stěna ve výpočtu, jaké mají vlastnosti a kdy se používají?
- 19. Kdy je možné využít symetrickou okrajovou podmínku, uveď te příklady?
- 20. Kdy je možné využít periodickou okrajovou podmínku, uveď te příklady?
- 21. Uveď te, jak je možné kombinovat vstupní a výstupní okrajové podmínky?

NUMERICKÁ SIMULACE PROUDĚNÍ V PROSTŘEDÍ 5 **ANSYS**

5.1 ZÁKLADNÍ KROKY NUMERICKÉ SIMULACE A **PROGRAMY**



Čas ke studiu: 0.2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat základní programy, které je nutné použít při CFD.
- popsat postup při numerické simulaci proudění.
- popsat možnosti a volby při CFD simulaci.



VÝKLAD

V současnosti je k dispozici celá řada komerčních programů, které je možné použít pro řešení úloh z oblasti proudění tekutin. Některé tyto programy jsou přímo implementovány jako moduly v některých CAD programech, jedná se však o úzce specializované programy s omezenými možnostmi nastavení. Pro obecné a komplexní použití existuje celá řada programů. V těchto skriptech budeme řešit praktické úlohy v programech fy ANSYS, protože jsou v současnosti poměrně rozšířené jak v ČR, tak i v EU a ostatních průmyslově vyspělých státech světa.

Proces numerické simulace sestává z těchto základních kroku.

Preprocessing je přípravná fáze numerické simulace. Tento krok sestává ve vykreslení geometrie, její úpravy a zjednodušování. Do tohoto kroku také patří příprava výpočetní sítě.

Processing je fáze definování a samotné řešení simulace. V tomto kroku jsou definovány všechny okrajové podmínky a nastaveny veškeré parametry řešení včetně samotného numerického řešení úlohy.

Postprocessing je fáze analýzy výsledků simulace. Součástí tohoto kroku je vytváření grafických výstupů (kolorovaných obrázků), získání důležitých parametrů a další podobné kroky.

Co se týče náročnosti je nejrozsáhlejším krokem preprocessing. V tomto kroku je nutné precizně připravit geometrii, odstranit všechny zanedbatelné entity. Také tvorba výpočtové sítě je jeden ze zásadních kroků, který silně ovlivňuje preciznost a délku výpočtu.

Jednotlivé kroky numerické simulace jsou proveditelné v základních programech, které jsou schopné provést pouze určité specializované úlohy, na které jsou specificky orientovány. Nyní si popíšeme základní programy, které budeme využívat při řešení základních úloh.

ANSYS WORKBENCH

Tento program slouží jako jednotné prostředí pro celou řadu programů. V tomto programu je možné vytvářet strom simulace a vytvářet vazby mezi jednotlivými kroky samotné simulace. Je zde možné také vytvářet vazby mezi jednotlivými variantami a modifikacemi. Program tak defacto zajišťuje přehledné vytváření simulace v daného projektu, přičemž uživatel může spouštět jednotlivé programy v tomto prostředí, aniž by musel hledat jednotlivé soubory simulace prostřednictvím souborového manažera. Tento program je spustitelný přímo z prostředí Windows.

DESIGN MODELER Tento program slouží k parametrickému asociativnímu kreslení 3D. V tomto programu je možné kreslit podobným způsobem jako u vyšších CAD programů, např. ProEngineer, Catia atd. Je zde možné načíst již hotové 3D modely vytvořené ve vyšších CAD systémech (*Catia, Pro/Engineer, Inventor,* atd.) a dále je zjednodušit a odstranit přebytečné entity. Výpočetní oblast je tak upravena a modifikována vhodným způsobem pro CFD simulaci. Tento program je spustitelný pouze v prostředí Workbench.

ANSYS MESHING

ANSYS CFX

ANSYS CFD POST

ANSYS ICEM CFD

Tento program slouží k vytváření strukturované výpočetní sítě. Je optimalizován pro výkon a tvorba výpočetní sítě je tak relativně jednoduchá. V programu jsou implementovány všechny základní typy elementů a je možné vytvářet jak hybridní tak uniformní síť, včetně mezní vrstvy. Při vytváření sítě je automaticky načten model vytvořený v programu Design Modeler a vytvořena vazba. Tento program je opět spustitelný pouze v prostředí Workbench

Tento program slouží k vytváření CFD simulací, tj. výpočtů metodou konečných objemů. Program je rozdělen do dvou základních modulů: 1. CFX-Pre tento modul slouží pro přípravu simulace, nastavení okrajových podmínek, definici materiálu atd. 2. CFX-Solver tento modul slouží pro samotné řešení úlohy připravené v CFX-Pre metodou konečných objemů. Tento program je spustitelný jak samostatně v prostředí Windows, tak i v prostředí Workbench.

Tento program slouží pro zobrazení výsledků simulace, která je výstupem CFX-Solver. Program umožňuje tvorbu konturovaných obrázků, vektorových polí proudnic, analýzu důležitých parametrů atd. Tento program je spustitelný jak samostatně v prostředí Windows, tak i v prostředí Workbench.

Tento program slouží pro tvorbu a úpravu geometrie, tak i vytvoření výpočetní sítě, a to jak strukturované tak i nestrukturované a hybridní či uniformní prostřednictvím všech základních typů elementů. Program umožňuje také tvorbu mezní vrstvy. Geometrii je možné vytvořit pomocí nástroje kreslení a modelování, které ale není asociativní, anebo je možné načíst geometrii z Design Modeleru nebo model vytvořený ve vyšším CAD. Při vytváření výpočetní sítě je možné proces řídit do nejmenších podrobností a uživatel tak může ovlivnit celou řadu parametrů. Jsou tak kladeny poměrně rozsáhle požadavky na znalosti uživatele z oblasti síťování. Program je vhodný pro

pokročilé uživatele a pro tvorbu velice kvalitních sítí pro důležité analýzy strojních celků.

Při vytváření CFD simulace máme v zásadě dvě možnosti:

1) Simulaci můžeme vytvořit v prostředí Workbench, přičemž veškeré vazby mezi programy se vytvoří automaticky, a programy spouštíme přímo z prostředí Workbench.

2) Simulaci můžeme vytvořit ručně a veškeré vazby musí vytvořit sám uživatel. Programy je pak nutné spouštět ručně z prostředí Windows.



Obr. 5.1. Schéma numerické simulace a vzájemné vztahy mezi jednotlivými programy.



Preprocessing příprava geometrie a výpočetní sítě.

Processing nastavení fyzikálních vlastností a okrajových podmínek CFD simulace, numerické řešení. **Postprocessing** zpracování výsledů do grafické podoby, analýza proudění a základních parametrů.



OTÁZKY Č. 5

- 1. Co se rozumí pojmem preprocessing?
- 2. Co se rozumí pojmem processing?
- 3. Co se rozumí pojmem postprocessing?
- 4. Jaké dvě základní cesty můžeme zvolit při tvorbě CFD simulace?
- 5. K čemu slouží program Workbench?
- 6. K čemu slouží program Design Modeler?
- 7. K čemu slouží program Meshing?
- 8. K čemu slouží program ICEM CFD?
- 9. K čemu slouží program CFX, z jakých základních komponent se skládá?
- 10. K čemu slouží program CFD Post?

6 CFD SIMULACE V PROSTŘEDÍ WORKBENCH6.1 VYTVOŘENÍ PROJEKTU CFD SIMULACE

Ø

Čas ke studiu: 0.25 hodiny

- Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět
 - vytvořit CFD simulaci v prostředí Workbench.



VÝKLAD

Popis úlohy

V této kapitole si na jednoduchém příkladě předvedeme základní postup při tvorbě numerické simulace proudění. Celý postup si budeme ilustrovat na jednoduché 2D úloze. Cílem této úlohy bude vizualizace proudového pole a sledování zavíření v rozšiřující se části širokého obdélníkového kanálu.



Obr. 6.1. Schematický náčrt řešené oblasti s definicí problému

Rozměry oblasti a okrajové podmínky

Délka oblasti	L = 5 m
Výška oblasti	d = 0.5 m
Výška schodu	$d_s = 0.2 \text{ m}$
Délka schodu	$L_s = 1 \mathrm{m}$
Rychlost na vstupu	v = 0.01 m/s
Statický tlak na výstupu	0 Pa (relativně)
Proudící tekutina	Vzduch

Definice Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{v D}{v}$$

kde v je rychlost, D je charakteristický rozměr oblasti a v je kinematická viskozita Výročet Porroldsova čísla po voturu

Výpočet Reynoldsova čísla na vstupu

 $Re = \frac{v (d - d_s)}{v}$ $Re = \frac{0.01 (0.5 - 0.2)}{15.55 \ 10^{-6}}$ Re = 192

Jedná se tedy o laminární proudění.

Vytvoření simulace

CFD simulaci v této kapitole provedeme v prostředí Workbench. První krok při vytváření simulace by měl spočívat ve vytvoření pracovního adresáře. V tomto pracovním adresáři pak budou ukládány veškeré soubory a výsledky (v těchto skriptech je použit adresář C:/Work a dále podadresář dle jména příkladu). Po vytvoření pracovního adresáře spustíme prostřednictvím ikony \Lambda program Workbench.



Obr. 6.2. Program Ansys Workbench

Program má velice jednoduchý vzhled, slouží totiž pouze jako univerzální pracovní rozhraní (pracovní stůl) a databázový systém. V programu jsou tři základní okna.

- Pracovní prostor: zde jsou umístěny všechny simulace, které uživatel vytvořil v projektu a jednotlivé vazby mezi nimi. Jednotlivé simulace jsou vizualizovaný prostřednictvím bloků. Přesněji si tyto bloky popíšeme později.
- 2) Informační panel: zde může uživatel sledovat průběh jednotlivých operací tzv. progress.
- **3)** Tools Box: zde je seznam dostupných simulací. Počet možností je závislý na nainstalovaných programech a také na licenci, kterou má uživatel. V tomto případě jsou k dispozici pouze moduly pro simulaci proudění v programu Ansys Fluent a Ansys CFX.

Tato skripta jsou zaměřena na program CFX, proto budeme využívat pouze modul S Fluid Flow (CFX).

Po spuštění programu uložíme prázdnou a neuloženou simulaci do pracovního adresáře pomocí ikony Save , nebo Save As . Jméno simulace bude v tomto případě Priklad1. (Student si může zvolit libovolné jméno).

Důležitá poznámka: Jméno nesmí obsahovat české znaky tj. č, ř, š, atd. a to ani ve jméně pracovního adresáře a ani cestě, proto je vytvořen pracovní adresář C:/Work.

Novou simulaci vytvoříme tak, že levým tlačítkem vybereme ze záložky *Analysis Systems* modul Fluid Flow(CFX) a při stále stisknutém levém tlačítku jej přesuneme do pracovního prostoru. V pracovním prostoru se vyznačí zelený čerchovaný obdélník, který reprezentuje místo, kde bude simulace vytvořena. Poté můžeme levé tlačítko uvolnit, přičemž se vytvoří prázdná CFD simulace se všemi potřebnými komponentami a vazbami. Jednotlivé "buňky" bloku představují programy, které je nutné během vytváření simulace spustit a vytvořit tak dané soubory. Postup je velice intuitivní, začínáme vždy první položkou a postupujeme směrem dolů, postupně tak jednotlivé položky editujeme.



Obr. 6.3. Základní komponenty CFD simulace

Simulace je označena písmene **A** a pod blokem je název *Fluid Flow*. Písmeno A není možné editovat, protože se jedná o systémovou proměnnou a písmeno je přiřazeno automaticky podle pořadí. (Pokud by uživatel do pracovního okna přidal další simulaci, bude umístěna napravo od první a bude označena písmenem B). Jméno *Fluid Flow* můžeme libovolně změnit, avšak jak již bylo řečeno bez české diakritiky. Jelikož zde budeme řešit proudění v oblasti s náhlým rozšířením, pojmenujeme si simulaci *Schod*. Takto připravenou simulaci uložíme **S**. Nyní máme připraveny veškeré položky simulace a můžeme začít jednotlivě editovat.



Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var1\ soubor Priklad1_var1_Video1.exe

6.2 VYTVOŘENÍ GEOMETRIE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

Ø

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• vytvořit geometrii v programu Ansys Design Modeler.



Popis úlohy

Výpočtovou oblast, která bude sloužit jako vzorový příklad, máme zobrazenu na následujícím obrázku.



Obr. 6.4 Schematický náčrt výpočtové oblasti

Jedná se velký rozměrný kanál, v němž proudí tekutina. Kapalina do oblasti vstupuje levou užší stranou a vystupuje širší pravou stranou. Předpokládáme, že oblast je široká a třetí rozměr je možné zanedbat. Tím se úloha zjednoduší na 2D a šířka kanálu může být geometricky zanedbatelná.

Design Modeler

Připravenou simulaci započneme editovat od první položky. Dvojklikem na buňku [©] Geometry začneme, spustíme program Ansys Design Modeler. Po spuštění programu Design Modeler je nejprve zobrazena výzva týkající se volby rozměrových jednotek. Jedná se tedy o to, v jakých jednotkách budeme definovat rozměry. Na výběr jsou všechny základní jednotky (mm, m, cm, µm, palce a stopy). My zvolíme rozměry v mm a volbu potvrdíme. Po potvrzení volby jsou vygenerovány tři základní roviny souřadného systému XY, XZ, YZ. Základní rozhraní programu Design Modeler je zobrazeno na Obr. 6.5. Pro přehlednost si v následující tabulce stručně popíšeme základní ikony

*	Vytvoření nové roviny
包	Vytvoření nové skicy
🖪 Extrude	Příkaz vysuň – vysunutí skicy do prostoru
Revolve	Příkaz rotuj – rotování skicy okolo osy
🌜 Sweep	Příkaz vytažení – vytažení skicy po definované trajektorii

A	
Skin/Loft	Příkaz potažení – vytvoření objemu z několika skic
Pr Ir Ir Ir	Filtr selekce – zaškrtnutím vybíráme pouze dané entity, body,
	přímky, plochy, objemy
📁 Generate	Příkaz vygeneruj – vytvoří danou entitu, potvrzení nastavení
	příkazů.
5 🕂 Q Q Q Q Q 🕄	Příkazy pro natočení pohledu a úpravu velikosti zobrazení
	v grafickém okně.

🔞 A: Schod - DesignModeler		x
File Create Concept Tools View Help		
] 🔄 🔜 🔚 📫 🗍 🗊 Undo 📿 Redo 🛛 S	lect 🏗 🏹 🖪 🖪 🖪 🚱 🖉 🗧 💠 🍳 🔍 🔍 🔍 🔍 🗱 🗛 🚳 🖊	
🛛 XYPlane 🔻 🛧 None 👻 💆		
📙 🧚 Generate 🛛 🖤 Share Topology 🛛 💽 Extrude	range 🚯 Sweep 🚯 Skin/Loft 🛛 Thin/Surface 🔷 Blend 🔻 🥎 Chamfer 🛷 Point 🔀 Parameters	
Tree Outline 4	Graphics	ą
E		1
ZXPlane		
YZPlane		
Okno se stromem		
geometrických entit		
geometricity on once		
	Pracovní grafické okno	
	Theovin graneke okno	
Sketching Modeling		
Details View 🛛		
	Y	
Okno pro definování	•	
nříkazů	0.00 50.00 (mm)	
Princed		X
	25.00	
	Model View Print Preview	
🖉 Ready	No Selection Millimeter 0 0	

Obr. 6.5 Grafické rozhraní Design Modeler

Vytvoření skicy

Kreslení začneme tvorbou skicy, (sketch) která bude reprezentovat tvar výpočtové oblasti. Postup je následující. Nejprve vyberme prostřednictvím levého tlačítka myši základní rovinu *YZPlane* a následně klikneme na ikonu pro vytvoření skicy 2^{3} . Ve stromu by se měla tato nová entita objevit právě u roviny *XYPlane*. Následně vybereme skicu levým tlačítkem myši, pravým tlačítkem vyvoláme menu a zvolíme kolmý pohled na rovinu skicy *Look at*. Pohled se tedy nyní upraví tak, že osa *X* je vodorovná, *Y* svislá a osa *Z* směřuje od obrazovky k uživateli. Postup je graficky zobrazen na Obr. 6.6



Obr. 6.6 Tvorba nové skicy



Panely nástrojů pro kreslení

Obr. 6.7 Panely nástrojů pro tvorbu skicy

Nyní můžeme začít s kreslením oblasti dle zadání. V menu kreslení *Draw* tedy vybereme příkaz přímka *Line*. Během kreslení se nezadávají rozměry, ale nejprve se vytvoří obrazec geometricky podobný tomu, který chceme nakreslit, ten se zakótuje a následně se upraví rozměry kót dle zadání. Během kreslení je také zapnut režim automatického uchopování a automatického vazbení entit. Význam jednotlivých písmen je v následující tabulce.

Význam velkých písmen vedle kurzoru a u geometrických entit

- P Uchopení bodu
- H Vodorovná přímka
- V Svislá přímka
- C Totožnost

Obrysové přímky začneme kreslit z bodu (0,0) ve směru hodinových ručiček. Naznačení pořadí kreslení je zobrazeno na Obr. 6.8



Obr. 6.8 Označení přímek a pořadí kreslení přímek

Postup při vytvoření první přímky č.1:

- Kurzor umístíme do blízkosti středu souřadného systému tak, aby se objevilo písmeno P. Levým tlačítkem potvrdíme volbu bodu
- 2) Kurzor posuneme svisle nahoru (ca 3cm na obrazovce) tak aby se u přímky objevilo písmeno V (jedná se o svislou přímku) a zároveň u koncového bodu bylo písmeno C (leží na ose Y). Volbu potvrdíme opět levým tlačítkem.



Obr. 6.9 Grafické naznačení postupu při vytváření přímky č.1

Přímku č. 2 začneme kreslit z koncového bodu přímky č.1. (Pokud v panelu *Draw* nevybereme jinou položku, je stále aktivní volba kreslení přímky)

- 1) Kurzor umístíme do blízkosti koncového bodu přímky č.1 tak, aby se objevilo písmeno P. Levým tlačítkem potvrdíme volbu bodu,
- 2) Kurzor posuneme vlevo (ca 5cm na obrazovce) tak, aby se u přímky objevilo písmeno H (jedná se o horizontální přímku). Volbu potvrdíme levým tlačítkem.



Obr. 6.10 Grafické naznačení postupu při vytváření přímky č.2

Přímka č.3

- Kurzor umístíme do blízkosti koncového bodu přímky č.2 tak, aby se objevilo písmeno P. Levým tlačítkem potvrdíme volbu bodu.
- 2) Kurzor posuneme svisle nahoru (ca 2cm na obrazovce) tak, aby se u přímky objevilo písmeno V (jedná se o vertikální přímku). Volbu potvrdíme levým tlačítkem.

Přímka č.4

- Kurzor umístíme do blízkosti koncového bodu přímky č.3 tak, aby se objevilo písmeno P. Levým tlačítkem potvrdíme volbu bodu.
- Kurzor posuneme vpravo (ca 15cm na obrazovce) tak, aby se u přímky objevilo písmeno H (jedná se o horizontální přímku). Volbu potvrdíme levým tlačítkem.

Přímka č.5

- Kurzor umístíme do blízkosti koncového bodu přímky č.4 tak, aby se objevilo písmeno P. Levým tlačítkem potvrdíme volbu bodu.
- 2) Kurzor posuneme svisle dolů co nejblíže k ose X, tak aby se u přímky objevilo písmeno V a u koncového bodu (kurzor) bylo písmeno C. Volbu potvrdíme levým tlačítkem.

Přímka č.6

 Kurzor umístíme do blízkosti koncového bodu přímky č.5 tak, aby se objevilo písmeno P. Levým tlačítkem potvrdíme volbu bodu. 2) Kurzor posuneme vlevo co nejblíže k počátečnímu bodu přímky.1 (střed souřadného systému) tak, aby se u přímky objevilo písmeno H a u koncového bodu (kurzor) bylo písmeno P. Volbu potvrdíme levým tlačítkem.

Výsledný obrys výpočtové oblasti by měl vypadat přibližně takto, viz Obr. 6.11



Obr. 6.11 Znázornění kompletní skicy

Nyní můžeme přistoupit ke kotování Skicy. Přepneme se ze záložky kreslení *Draw* do záložky kótování *Dimensions*. Postup je znázorněn na následujícím obrázku. Levým tlačítkem vybereme záložku kotování *Dimensions*. Ta způsobí minimalizaci panelu kreslení a následné plné zobrazení panelu kótování.



Obr. 6.12 Panel kotování

Kotovaní slouží pro definování rozměrů nakresleného obrazce. Kotování začneme horizontálními kótami. V *Dimensions* menu tedy vybereme koty *Horizontal*. Postup kótování je obdobný s postupem kreslení. První horizontální kótou určíme maximální délku oblasti. Postup je následující:

- Kóta č.1
- Kurzor umístíme do blízkosti přímky č.3 tak, aby přímka změnila barvu z modrozelené na oranžovou. Levým tlačítkem potvrdíme volbu přímky. Ta nyní změní barvu na žlutou (znamená, že přímka je vybrána)
- Kurzor posuneme vpravo k přímce č.5. tak, aby přímka opět změnila barvu na oranžovou. Volbu potvrdíme levým tlačítkem.

Nyní by se měla naznačit horizontální kóta, pohybem kurzoru (nahoru nebo dolu) je možné kótu umístit do libovolné pozice. Umístění kóty potvrdíme levým tlačítkem, po potvrzení umístění by se měla zobrazit horizontální kóta označena H1, viz Obr. 6.13.



Obr. 6.13 Horizontální kóta H1

Stejným postupem zakótujeme druhý horizontální rozměr mezi přímkami č 1 a 3, tj. délku užší části výpočtové oblasti. Po vytvoření horizontální kóty H2 změníme styl kóty z horizontální na kótu vertikální. Zakótujeme celkovou výšku mezi přímkami č.4 a 6, kótu V3, a dále výšku zúžené části, tj. výšku mezi přímkami č.2 a 4, kótu V4. Po umístění kóty V4 změní obrys barvu z modrozelené na sytě modrou, tím je signalizováno kompletní zakótování obrysu, tj. obrys je jednoznačně definován (jakákoli přímka nebo bod, který je sytě modrý, je již jednoznačně definován). Zakótovaná skica by měla vypadat následovně (umístění kót závisí na uživateli), viz Obr. 6.14.



Obr. 6.14 Kompletní zakótování

V levé dolní části obrazovky je vždy zobrazena tabulka s vlastnostmi dané entity, v našem případě jsou zde informace o nákresu č.1 (*Sketch1*), viz Obr. 6.15.



Obr. 6.15 Detaily položky Sketch1

V této tabulce jsou vždy zobrazeny veškeré informace o dané položce. V tomto případě jsou zde informace o kótách, jejich číselné velikosti, počtu přímek a jménu (*Sketch1*). V tabulce změníme rozměry dle zadání, viz Obr. 6.4. Kótu číselně změníme tak, že levým tlačítkem klikneme na číslo a následně ho přepíšeme, kliknutím na jinou položku tabulky, nebo stisknutím klávesy *Enter* se změna aplikuje. Takto změníme hodnoty všech kót, viz Obr. 6.16. Po provedení změn rozměrů kót můžeme pomocí nástroje *move* v panelu kotování *Dimensions* posunout kóty dle vlastního uvážení.

🗌 H1	86,678 mm	🗌 H1	5000 mm
H2	37,701 mm	H2	1000 mm
□ V3	33,622 mm	 V3	500 mm
□ V4	15,701 mm	V4	300 mm





Obr. 6.16 Změna rozměru kót

Vytvoření objemu

Po provedení všech úprav můžeme přistoupit k vytvoření 3D objemu. Přestoře má být úloha řešena jako 2D, je nyní nutné vytvořit 3D objem. Nejjednodušší bude daný obrys vysunout pomocí příkazu *Extruze*. Přepneme tedy zobrazení ze záložky *Sketching* na *Modeling*. Levým tlačítkem vyberme objekt *Sketch 1* a stiskneme ikonu *Extrude*. Ve stromu se nyní zobrazí nová položka se jménem *Extrude 1* for Extrude a v dolní levé části obrazovky se zobrazí tabulka s nastavením této položky. Příkaz vysunutí ještě nebyl proveden, to signalizuje symbol žlutého blesku vedle položky. Jelikož je třetí rozměr (vysunutí v ose Z) nepodstatné, je možné ponechat všechny položky v tabulce v původním nastavení. My ale změníme výšku vysunutí na 10 mm, nyní můžeme stisknout tlačítko *Generate* $\frac{1}{2}$ Generate.

také ve stromu změní u položky *Extrude* 1 symbol z blesku na zelené zatržení $\sqrt{\mathbb{R}} = \mathbb{E} \times \mathbb{E} \times \mathbb{E}$ symbol zeleného zatržítka značí, že příkaz byl vykonán korektně.



Obr. 6.17 Postup při vytvoření 3D objemu příkazem vysuň (Extrude)

Nyní si stručně popíšeme jednotlivé položky v okně *Details View* u příkazu *Extrude*. Řádek č.

- 1) vlevo- typ příkazu (*Extrude*), vpravo jméno které je možné změnit (*Extrude1*)
- 2) zdrojová entita příkazu (*Base Object*), tj. co se bude vysouvat, vpravo jméno vybrané entity (*Sketch1*)
- 3) typ operace (*Operation*), tj. co se bude během vysouvání dít s objemem, vpravo vybraná operace přidat materiál (*Add Material*). Existuje několik možností *Add Material* přičtení, vytvoření objemu; *Cut Materiál* odečtení objemu; *Add Frozen* vytvoření neaktivního objemu. Položek je více, ale my si s těmito v tomto příkladě vystačíme.
- 4) Direkční vektor vysunutí (*Direction Vector*) standardně v kladném směru osy Z, tj. kolmo na skicu.
- 5) Směr vektoru (*Direction*) udáváme směr vysunutí. *Normal* ve směru +Z; *Reversed* ve směru Z; *Both Symmetric* v obou směrech stejně; *Both Asymmetric* v obou směrech různě.
- 6) Ukončení vysunutí (*Extent Type*) jakým způsobem bude definována výška vysunutí. *Fixed* – číslem; *To Surface* – vysunutí do specifikované plochy; *To Plane* – vysunutí do specifikované roviny; *To Next* – vysunutí k nejbližší entitě; *Trough All* – vysunutí skrz všechny entity.
- Zde se mění položka na základě předchozí volby. My volíme vysunutí konstantní dané výškou, proto je zde rozměr.
- 8) Skořepina (*As Thin/Surface*) nevysouvá se objem ale pouze obrys (nekonečně tenká skořepina), případně je možné zadat tloušťku a bude se vysouvat objem.
- 9) Slučování topologie (*Merge Topology*) odstraňování duplicitních entit během operace.

Tato tabulka se mění na základě zvoleného příkazu (vysuň, rotuj, protáhni atd.), ale její uspořádání je vždy podobné. Takto nakreslený objem se již může rozdělit na konečné elementy. Z cvičných důvodů si nyní ukážeme, jak objem rozdělit, aby byl složen z několika částí (základních obdélníků), ale v programu vystupoval jako jeden objem. Takto rozdělený objem je poté možné rozdělit na konečné elementy kartézskou sítí (pravoúhlá síť). Vytvořený objem nejprve deaktivujeme "zamrazíme", tj. pozastavíme vykonávání automatického sčítání objemů, které se dotýkají nebo do sebe pronikají. Pokud bychom tento příkaz nevytvořili, jakýkoli příkaz, který by souvisel z dělením materiálu, by se sice vykonal, ale následně by se oddělené objemy znovu sloučily a provedený příkaz by se tím anuloval. V textovém menu tedy zvolíme položku *Tools* a následně v menu vybereme příkaz *Freeze*, viz Obr. 6.20.

Objem tedy rozdělíme tak, aby sestával pouze z jednotlivých kvádrů. Hranice dělení objemu jsou naznačeny na následujícím obrázku, zelené čáry představují hranice mezi jednotlivými objemy. Jednotlivé nově vzniklé objemy jsou označeny růžným šrafováním.



Obr. 6.18 Princip rozdělení objemu na tři podoblasti

Na základě obrázku Obr. 6.18 vytvoříme novou skicu, která bude obsahovat dělící přímky. Postup je tedy následující, viz také grafické znázornění postupu:

- 1) Levým tlačítkem vybereme rovinu *XYPlane*, ikonou ²⁰ vložíme novou skicu (*Sketch2*) a přepneme se do menu kreslení (*Sketching*).
- 2) Skica č.2 (*Sketch2*) je na stejné rovině, proto můžeme pro kreslení využít také entity ze skicy č.1 (*Sketch1*), ale nemůžeme je měnit. První přímku vedeme z koncového bodu přímky č.1. Kurzor umístíme co nejblíže rohu tak, až se objeví písmeno P, volbu potvrdíme levým tlačítkem. Kurzor posuneme nahoru mírně zešikma (ca 15° na libovolnou stranu) tak, až se zvolí automaticky horní přímka ze skicy č.1 (změní barvu na fialovou) a u průsečíku se objeví písmeno C. Volbu potvrdíme levým tlačítkem. Druhou přímku vytvoříme obdobně. Kurzor opět umístíme co nejblíže rohu tak, až se objeví písmeno P a volbu potvrdíme. Kurzor nyní posuneme vpravo tak, až se automaticky zvolí přímka č5 (změní barvu na fialovou), ve středu přímky by se mělo zobrazit písmeno H a u průsečíku přímek písmeno C. Volbu potvrdíme.
- 3) Nyní se přepneme z panelu kreslení (*Draw*) do panelu vazeb (*Constrains*). Vybereme příkaz vertikálně (*vertical*) a vybereme levým tlačítkem první (šikmou) přímku. Ta se nyní zafixuje ve vertikální poloze. Skicu není nutné kótovat, protože všechny její rozměry jsou jednoznačně dány.
- 4) Vytvořený objem následně deaktivujeme "zamrazíme", tj. pozastavíme vykonávání automatického sčítání objemů, které se dotýkají nebo do sebe pronikají. Pokud bychom tento příkaz nevytvořili, jakýkoli příkaz, který by souvisel z dělením materiálu, by se sice vykonal, ale následně by se oddělené objem znovu sloučily a provedený příkaz by se tím anuloval. V textovém menu tedy zvolíme položku *Tools* a následně v menu vybereme příkaz *Freeze*, viz Obr. 6.20.
- 5) Přepneme se do menu modelování (*Sketching* \rightarrow *Modeling*), vybereme levým tlačítkem skicu č.2 (*Sketch2*) a zvolíme příkaz vysuň (*Extrude*).

- 6) V tabulce příkazu změníme pouze následující položky: zvolíme operaci dělení materiálu (*Operation Slice Material*), ukončení vysunutí nebude definováno (*Extent Type Trough All*), bude se jednat o nekonečně tenké plochy (*As Thin/Surface Yes*), vnější a vnitřní tloušťka bude nulová (*Inward ,Outward thickness 0 mm*)
- 7) Příkazy aktivujeme tlačítkem *Generate*. Tím jsme obdrželi tři objemy, které se navzájem přesně dotýkají, ale existují jako samostatné entity.







Počet objemů je vyobrazen v dolní části stromu v položce *Parts*. Výsledné tři objemy si nyní sloučíme do jedné entity. Vyberme tedy všechny tři objemy *Solid* pomocí levého tlačítka a současně stisknutého tlačítka CTRL, a poté vyvoláme menu pravým tlačítkem. V tomto menu vybereme příkaz *Form New Part*. Tím provedeme sloučení objemů, ale ne jejich sečtení. Jako poslední krok provedeme změnu jména z *Part1* na *Fluid*. Tímto krokem je dokončena tvorba výpočtové oblasti.



Obr. 6.22 Formování skupiny objektů, sloučení objemů

Tímto krokem je ukončena tvorba geometrie. Vytvořenou geometrii uložíme \blacksquare a ukončíme Design Modeler z textového menu File \rightarrow Close Design Modeler. V prostředí Workbench si pak můžeme povšimnout, že u první položky se změnil v levé části symbol. Původně byl označen modrým otazníkem, který znamená, že položka není vůbec definována (je prázdná). Po vytvoření geometrie, která neobsahuje žádnou chybu, se zde objeví zelená "zatržítko".

	А				-		A		
🕄 I	Fluid Flow (CFX)			Vytyořaní goomotrio	1	C	Fluid Flow	(CFX)	(CFX)
9	Geometry	?	7	v ytvoreni geometrie	→ 2	m	Geometry		~
@	Mesh	2			3		Mesh		Ŕ
()	Setup	2	4		4		Setup		9
(Solution	?	4		5	6	Solution		1
🥑 F	Results	?	4		6	9	Results		-

Obr. 6.23 Změna položky Geometry po vytvoření geometrie



Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var1\ soubor Priklad1_var1_Video2.exe

6.3 VYTVOŘENÍ SÍTĚ



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

|--|

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• vytvořit jednoduchou kartézskou výpočetní síť.



D Načtení geometrie, pojmenování ploch

Tvorba výpočetní sítě je jeden z důležitých kroků při použití metody konečných prvků. Kvalita sítě je jedním z podstatných parametrů, který ovlivňuje dominantně výsledky výpočtů. Tvorbu sítě započneme dvojklikem na položku ^{Mesh}.

Tímto příkazem je automaticky načtena nakreslená geometrie a spuštěn program *Meshing*. Jistě jste si všimli, že v prostředí *Workbench* se každý samostatný program jeví jako položka. Mezi položkami je možné plynule přecházet a kdykoli tak provést změnu v geometrii, která se poté automaticky přenese do výpočetní sítě.

Po spuštění programu *Meshing* se v pravé části zobrazí panel, v němž je možné zvolit, jaký typ sítě budeme vytvářet. Ostatní položky není možné měnit, protože je již přednastavena simulace s programem CFX, takže je automaticky definována síť pro CFD programy. Výpočetní sítě pro jednotlivá fyzikální odvětví nejsou totiž vzájemně kompatibilní. Pro přehlednost si nyní vysvětlíme jednotlivé položky této nabídky.



Obr. 6.24 Zobrazení startovací nabídky programu Meshing

Tuto úvodní volbu přeskočíme tlačítkem *OK* a veškeré nastavení provedeme ručně. Grafické rozhraní je velmi podobné programu *Design Modeler* a princip ovládání je stejný. V levé horní části je strom sítě. Vlevo dole je tabulka s nastavením. Pro lepší orientaci a následnou práci se sítí v CFX provedeme pojmenování jednotlivých ploch geometrie. V tomto jednoduchém případě by sice pojmenování

nebylo nutné, ale z cvičných důvodu jej provedeme. Pojmenování jednotlivých ploch je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 6.25 Pojmenování ploch

Postup pro pojmenování ploch je velice jednoduchý. Ve výběrovém menu zvolíme položku plocha, čímž se budou vybírat pouze plošné entity. Vybereme čelní plochu, která reprezentuje vstup tekutiny, viz Obr. 6.1. Pravým tlačítkem vyvoláme menu a zvolíme položku *Create Named Selection*. Následně se objeví okno, které slouží pro zvolení jména. Vybranou plochu tedy pojmenujeme INLET a volbu potvrdíme *OK*. Ve stromu simulace se pak objeví nová položka **Pamed Selections**, která představuje pojmenované plochy.



Obr. 6.26 Pojmenování plochy reprezentující vstup kapaliny INLET

Obdobným postupem pojmenujeme zbylé plochy. Pojmenování ploch je možné vytvořit také pro skupinu, čímž je možné vytvořit seskupení ploch, které jsou sice geometricky oddělené, ale v budoucí *CFD* simulaci budou mít definovány stejné fyzikální parametry a vlastnosti. Výběr více ploch se provádí levým tlačítkem se současně stisknutou klávesou *Ctrl*. Pojmenování ploch může být libovolné, nesmí se však používat česká diakritika (proto autor používá anglické názvy).

U Typ výpočetní sítě, metoda síťování

Pokud je správně nastavena fyzikální podstata problému, můžeme přikročit k zadávání příkazů pro tvorbu sítě. Příkazy vkládáme prostřednictví menu, které vyvoláme pravým tlačítkem. Postup je tedy následující:

- 1) Levým tlačítkem vybereme položku *mesh* Mesh.
- 2) Pravým tlačítkem vyvoláme menu a dále vybereme položku Method.

- 3) V tabulce nyní zvolíme objem, pro který definujeme toto nastavení. Vybereme objem reprezentující vstupní zúženou část.
- 4) Po potvrzení volby objemu zvolíme metodu. V položce *Method* zvolíme metodu *Sweep* (vysunutí sítě ve vrstvách).
- 5) V položce *Src/Trg Selection* zvolíme volbu *Manual Source and Target* a zvolíme jednu boční stěnu objemu jako zdroj *Source*. Druhou boční stěnu objemu pak zvolíme jako cíl *Target*. Vysunutí tedy bude probíhat ve směru kolmém na vybrané plochy.
- 6) Jelikož vysunutí reprezentuje tloušťku objemu, kterou zanedbáváme, počet vrstev bude v položce *Sweep Num. Divs* roven 1.

Celý postup je také graficky zobrazen na Obr. 6.27. Tímto je pouze definována metoda.



Obr. 6.27 Nastavení typu sítě u prvního objemu

Pro zbylé dva objemy bude postup identický. Celkem tedy bude v položce ²⁴ Mesh 3x vybrána metoda vysunutí sítě *Sweep Method* viz Obr. 6.28. Kompletně je tak definován typ sítě pro celou výpočetní oblast.



Obr. 6.28 Strom sítě, po úspěšném definování metody pro jednotlivé objemy

□ Síťování přímek

V předchozím kroku jsme definovali metodu síťování. nyní musíme zvolit velikost elementů na jednotlivých přímkách geometrie. Velikost elementu je možné definoval jak na přímkách/křivkách, tak i na plochách. Definování velikosti elementu na ploše by bylo v tomto případě jednodušší a rychlejší, my si ale ukážeme, jak je možné řídit velikost elementů. Z teorie již víme, že oblast v okolí pevné stěny se vyznačuje velkými gradienty rychlosti. Proto je v důležité v blízkosti stěny síť zahustit. My si tedy takovéto nastavení vyzkoušíme. Výpočetní síť zahustíme ke stěnám a ještě k oblasti náhlého rozšíření, kde dochází k odtržení proudu tekutiny. Síť vytvoříme jako uniformní a kartézskou. Příkazy vkládáme opět prostřednictví menu, které vyvoláme pravým tlačítkem. Postup je tedy následující:

- 1) Levým tlačítkem vybereme položku *Mesh*.
- 2) Pravým tlačítkem vyvoláme menu a dále vybereme položku *Sizing*.
- 3) V tabulce nyní zvolíme přímky, pro které definujeme toto nastavení. jelikož bude síť konformní, musí být velikost elementů na rovnoběžných přímkách jednoho elementu stejná. Abychom nemuseli vybírat jednotlivé přímky postupně, změníme vybírací režim z jednotlivého výběru a skupinový výběr . Znamená to, že výběr budeme provádět prostřednictvím obdélníku (entity uvnitř budou vybrány). Zároveň zkontrolujeme, že vybírané entity budou přímky .
- 4) Vybereme všech šest svislých přímek v užší horní části (přímky 1 až 3)
- 5) V položce *Type* zvolíme *Number of Divisions*, tj. počet elementů na přímce. Volba *Element Size* znamená, že bychom zadávali velikost elementu.
- 6) V položce *Number of Divisions* zadáme počet elementů na přímce. V našem případě zadáme hodnotu 40.
- 7) V položce *Behavioral* zvolíme možnost *Hard*, což znamená že počet elementů bude přesně dodržen.
- 8) Zjemnění sítě zadáváme položkou *Bias Type*. vybereme možnost -- --- -. která značí že, ve středu přímek budou velké elementy a směrem ke koncům se budou zmenšovat. Tuto volbu je nutné kontrolovat, protože závisí na orientaci přímek.
- 9) V položce *Bias Factor* nastavíme hodnotu 5, což je poměr největšího a nejmenšího elementu na přímce.

Po kompletním nastavení se na přímkách zobrazí náhled elementů, nyní je možné zkontrolovat nastavení a případně některé hodnoty změnit. Postup pro nastavení velikosti elementů je zobrazen na Obr. 6.29. Obdobně budeme postupovat při nastavení ostatních přímek. základní parametry jsou uvedeny v tabulce Tab. 6.1. Označení přímek je uvedeno na obrázku viz Obr. 6.30.



Obr. 6.29 Nastavení velikosti elementů a jejich zhuštění u stěn



Obr. 6.30 Označení přímek při procesu síťování

		i ovani u jeun	iourvyen primek	
Přímky č.	Počet elementů	Nastavení	Zjemnění	Velikost
	Number of Divisions	Behavior	Bias Type	Bias Factor
1, 2, 3	40	Hard		5
4,5	20	Hard		5
6	200	Hard		10
7, 8	200	Hard		10
9	50	Hard		10
10	50	Hard		10

Tab. 6.1 Nastavení síťování u jednotlivých přímek

□ Síťování oblasti

Po kompletním nastavení všech přímek je možné vygenerovat výpočtovou síť. Generování sítě spustíme prostřednictvím ikony ^{JUpdate}. Následně je spuštěn automaticky proces a v dolní části obrazovky se objeví okno znázorňující stav procesu. po skončení procesu je zobrazena v grafickém okně objemová síť.



Obr. 6.31 Zobrazení procesu generování objemové sítě

Po její vizuální kontrole uložíme soubor se sítí příkazem *File* \rightarrow *Save Project...* Po uložení souboru je možné program ukončit příkazem *File* \rightarrow *Close Meshing.* V prostředí *Workbench* se po vytvoření sítě, která neobsahuje žádnou chybu, změní původní symbol na zelené "zatržítko".

•	A		-	A
1	🔇 Fluid Flow (CFX)		1	S Fluid Flow (CFX)
2	🔞 Geometry	Vytvoření sítě	2	🝈 Geometry 🛛 🗸 🖌
3	🍘 Mesh 🛛		3	🍘 Mesh 🗸 🗸
4	🍓 Setup		4	🍓 Setup 🛛 🨂 🖌
5	🕼 Solution		5	🕼 Solution 🛛 😨 🖌
6	😥 Results		6	😥 Results 🛛 💡 🖌
_	01			

Obr. 6.32 Změna položky Mesh po vytvoření sítě



Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var1\ soubor Priklad1_var1_Video3.exe

6.4 VYTVOŘENÍ CFD SIMULACE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• nastavit CFD simulaci v programu CFX.



Program CFX

Po vytvoření geometrie a vygenerování sítě můžeme přistoupit k dalšímu kroku, a to vytvoření CFD výpočtu v programu CFX. Program CFX je založen, stejně jako program *Fluent*, na řešení základních rovnic zachování metodou konečných objemů. Samotný program CFX sestává ze tří základních "komponent", které pracují nezávisle na sobě a je možné je spouštět samostatně.

Jedná se o:

1. **CFX-Pre** – preprocessor sloužící pro definování úlohy z hlediska fyzikálních parametrů. (okrajové podmínky, turbulentní/laminární model, materiál, atd.). Používá

příponu *.cfx. V projektu je program reprezentován položkou 💐 Setup.

2. **CFX-Solver** – jedná se o prostý řešič, slouží pouze pro provedení výpočtu a zapsání výsledků do souboru. Používá příponu *.def a vytváří výsledky *.res nebo *.bak. V projektu je program reprezentován položkou **Solution** .

3. **CFD Post** – postprocessor slouží pro grafické vyhodnocení výsledku simulace. (vyhodnocovací roviny, body, přímky, konturované obrázky, vektorová pole, atd.), používá příponu *.res (pouze soubor s číselnými výsledky, načíst je možné i výsledky z jiných programů např. *Fluent*,) a příponu *.cst (soubor s vyhodnocovacími rovinami a

grafickými výstupy apod.). V projektu je program reprezentován položkou 🥪 Results .

Depis CFX -Pre

Úlohy se definují v modulu *CFX-Pre*, který spustíme prostřednictvím ikony ^{Setup}. Následně se objeví grafické okno programu *CFX-Pre*. Příklady řešené v těchto skriptech budeme definovat z cvičných důvodů manuálně, proto si popíšeme standardní grafické rozhraní *CFX-Pre*, viz Obr. 6.33. Grafické rozhraní obsahuje tyto základní prvky:

Textové menu - obsahuje veškeré příkazy, které je možné v *CFX-Pre* spustit (příkazy je možné z 90% spustit pomocí ikon z ikonového menu).

Ikonové menu - obsahuje ikony, které slouží pro spuštění většiny příkazu. Smysl práce je z leva doprava, tedy úlohu definujeme pomocí ikon a začínáme levou ikonou a postupujeme směrem doprava.

Ikony pro definici pohledů, pohybů a výběrů - obsahuje ikony, které slouží pro grafické operace, tedy zvětšení, zmenšení, rotace, posuv, pohled atd.

Grafické okno – zde je zobrazena výpočtová oblast včetně naznačených okrajových podmínek.

Okno textových upozornění – zde jsou zobrazena všechna varování současně s doporučením, jak chybu odstranit (pokud je okno prázdné, je úloha bez chyb).

Pracovní okno – zde je zobrazen strom (*tree*) úlohy, tedy položky definované v úloze. Každou položku je možné editovat dvojklikem. Po dvojkliku se v pracovním okně objeví panel pro podrobnou

definici dané položky stromu. V následující tabulce je uveden stručný popis ikon v *CFX-Pre* a jejich funkce_____



📄 🔹 🖡	💐 🔩 🞯 🤊 🤄 🎬 🏚 🍐 X 🚾 🖬 🀅 🕐 🗇 👘 🐘 👘 骗 🕟
	Uložení simulace.
B P	Importování souboru *.ccl.
	Export souboru *.ccl.
1	Tisk a/nebo uložení obrázku z grafického okna.
5	Krok zpět-vpřed.
B C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	Otevření výpočetní sítě ze souboru
	podpora 16 typů programů, např. Fluent a Gambit, ICEM, Nastran, Patran, Ideas, Ansys,
	Catia, atd.
	podpora 28 typů sítí např. *.cas, *.msh, *.grd, *.cdb, *.cmdb, *.dsdb, *.unv, atd.
L3	Definice materiálu.
0	Definice chemické reakce.
x	Definování dodatkové proměnné (veličina, která není standardně používaná a je definována
	prostřednictvím základních veličin).
Va	Definice obecného algebraického vzorce, slouží např. pro definování profilu rychlosti,
	funkčních závislostí, materiálových vlastností atd.
sub	Definice procedury v jazyce Fortran.
f _×	Definice uživatelské funkce.
ja.	Definice souřadného systému, standardně je definován automaticky na základě výpočetní
	sítě, není nutno jej definovat.

0	Definice typu úlohy, stacionární (nezávislá na čase), nestacionární (závislá na čase)
•	Standarda i a outomotialus definescina tanionémi (ilaka, není nutra definesce).
	Standardne je automatický definovana stacionarm ulona, nem nutno definovat.
	Definice výpočetní oblasti, tj. oblasti kde proudí tekutina, oblasti kde je pevná stěna, atd.
	Vytvoření podoblasti, např. porézní zóna, zdrojový člen v dané oblasti.
	Vytvoření zdrojového bodu, např. generace látky v bodě.
Ħ	Definice okrajových podmínek, např. Vstup, Výstup, Symetrie, atd.
and a	Definice propojení sítí (interface).
D _{t=0}	Definice inicializačních podmínek (počáteční podmínky).
HR ال	Definice adaptačních kritérií (zjemňování sítě).
1	Nastavení řešiče, interpolační schémata, advekční schémata, konvergenční kritéria atd.
a	Definice monitorovacích bodů a dodatkových výstupů řešiče.
	Zapsání zdrojového souboru pro řešič *.def a následné spuštění řešiče.

D Načtení výpočetní sítě, definice výpočetní oblasti



Obr. 6.34 Pracovní plocha po načtení výpočetní sítě

Nyní ještě provedeme přejmenování podmínky z výchozího jména *Default Domain* na jméno *Fluid* (tekutina). Menu vyvoláme kliknutím pravým tlačítkem na výpočtovou oblast Comain, viz Obr. 6.35. Ve vyvolaném menu zvolíme položku *Rename*, a přepíšeme položku *Default Domain*, na *Fluid* a potvrdíme. Přejmenování je provedeno pouze z cvičných důvodů a nemá na výpočet žádný vliv.


Obr. 6.35 Přejmenování výpočtové oblasti

Nyní budeme modifikovat doménu *Fluid*. Modifikaci provedeme dvojklikem na tuto oblast stromu Fluid v levé části obrazovky (jakoukoli entitu je možné jednoduše editovat dvojklikem na danou položku ve stromu). Po provedení tohoto příkazu se v pracovním okně zobrazí záložky s vlastnostmi výpočetní oblasti. V těchto záložkách budeme definovat základní vlastnosti, které se týkají výpočtu. (proudící látka, režim proudění, gravitace, atd.), viz Obr. 6.36.

Outline Domain:	Fluid		×	Outline	Domain: Fluid			E	3
Details of Fluid in Flor	w Analysis 1		De	etails of F	Fluid in Flow Ana	alysis 1			-
Basic Settings F	Fluid Models Initialisation		_ []	Basic Se	ettings Fluid N	odels Initialisation			
Location and Type		k		-Heat Ti	ransfer				
Location	Assembly	•		Option		Isothermal	•		
Domain Type	Fluid Domain	•		Fluid Te	emperature	25 [C]			
Coordinate Frame	Coord 0	•		Turbule	ence			Ξ	
Fluid and Particle [Definitions			Option		None (Laminar)	•		(1) III Street (10) Pay Po 400 Same Tank State Same
Fluid 1		F		Combu	ustion	6		Ξ	
				Option		None	•		
				Therma	al Radiation			Ξ	
Fluid 1				Option		None	-		
Option	Material Library	•							
Material	Air at 25 C								
Morphology		8							
Option	Continuous wuid 🗸								
	Volume Fraction								
Domain Models									
Pressure									
Reference Pressu	re 1 [atm]								
Buoyancy									
Option	Non Buoyant	•							
ОК	Apply Close			OK	Apply	Close			

Obr. 6.36 Definování výpočtové oblasti

Pro přehlednost si vysvětlíme jednotlivé položky těchto nabídek. 1) Basic Settings (hlavní nastavení)

Location	– objemové entity, pro něž platí nastavení v těchto záložkách (objemy ve kterých bude proudit tekutina). V našem případě existují tři objemy, a jejich sestava. Můžeme tedy ponechat původně automaticky načtené objemy, anebo vybrat sestavu Assembly, tato volba výpočet neovlivní, změní tedy původní objemy na sestavu
Domain Type	 – typ domény, <i>Fluid Domain</i> (tekutina), <i>Solid Domain</i> (pevná látka), <i>Porous</i> <i>Domain</i> (porézní oblast). V pašem případě ide o tekutinu tedy <i>Fluid Domain</i>
Material	 proudící tekutina, standardně je k dispozici vzduch, vzduch při 25°C a voda. V našem případě použijeme vzduch při 25°C (<i>Air at 25°C</i>). Ostatní materiály isou k dispozici v databázi.
Coordinate frame	 – souřadný systém dané oblasti, není nutno definovat (standardně je dán souřadným systémem sítě, respektive souřadným systémem, který jsme zvolili během kreslení).
Reference Pressure	 referenční tlak, relativní nulový tlak ve výpočtu (standardně se 0 Pa ve výpočtu rovná tlaku 101325 Pa absolutně).
Buoyancy	– zahrnutí vztlaku (gravitace do výpočtu), v našem případě je výpočet bez gravitace ponecháme tedy volbu <i>Not Buoyant</i> .
Domain Motion	 – zahrnutí pohybu oblasti do výpočtu (např. rotující oběžné kolo čerpadla). V našem případě se oblast nepohybuje, ponecháme tedy volbu <i>Stationary</i>.
Mesh Deformation	 – zahrnutí deformace oblasti do výpočtu (např. uzavírání a otevírání ventilu). V našem případě se oblast nedeformuje, ponecháme tedy volbu <i>None</i>.
2) Fluid Models (model t	ekutiny)
Heat Transfer	 – zahrnutí přestupu tepla do výpočtu. Existují čtyři volby <i>None</i> (bez teploty), <i>Isothermal</i> (konstantní teplota), <i>Thermal Energy</i> (výpočty přestupu tepla a podzvuková komprese a expanze), <i>Total Energy</i> (výpočty rázových vln). V našem případě ponecháme volbu <i>Isothermal</i>.
Turbulence	 volba turbulentního modelu (13 modelů). Dle zadání se jedná o laminární
	proudění, zvolíme tedy pomocí tlačítka <u>u</u> turbulentní model <i>None</i> (<i>Laminar</i>).
Reaction or Comb	– zahrnutí chemických reakcí a spalování do výpočtu. Chemismus ani reakce neřešíme, proto ponecháme volbu <i>None</i> .
Thermal Radiation z	ahrnutí termické radiace do výpočtu. Termickou radiaci neřešíme, ponecháme tedy volbu <i>None</i> .

3) Initialization

Inicializace domény není v tomto případě nutná, inicializaci provedeme až jako předposlední krok pomocí globální inicializace.

Po nastavení domény potvrdíme tlačítkem *Apply* a *Close*, anebo *OK*, a vrátíme se do původního zobrazení se stromem, viz Obr. 6.34.

Definice okrajových podmínek

Okrajové podmínky nám definují hranice oblasti, jinými slovy vždy musíme definovat vlastnosti stěn výpočtové oblasti. Okrajové podmínky se definují pomocí ikony **J** z ikonového menu. Po kliknutí na tuto ikonu se objeví okno, viz Obr. 6.37.

😁 Insert Boundary	? X
Name Inlet	
OK	Cancel

Obr. 6.37 Okno pro vložení okrajové podmínky

Name

pojmenování okrajové podmínky. Můžeme použít libovolné pojmenování (v názvech nepoužívejte české a systémové znaky, např. ě, š, č, atd. a ?, @, &, atd.). V našem případě pojmenujeme podmínku *INLET* (vstup), tak aby se jméno shodovalo s pojmenováním plochy při tvorbě sítě.

Po provedení změn potvrdíme volbu tlačítkem *Ok*. Nyní se stejně jako v případě definování výpočtové oblasti, viz Obr. 6.36, objeví v pracovním okně několik záložek pro definování všech nezbytných vlastností okrajové podmínky pojmenované *Inlet*, viz Obr. 6.38.

Outline Boundary: Inlet Z	Outline Boundary: Inlet Details of Inlet in Fluid in Flow Analysis 1	
Basic Settings Boundary Details Sources Plot Options Boundary Type Inlet Location Coord Frame BOTTOM, WALL MIL_ET MIL_ET MIL_ET SYMMETRY_LEFT SYMETRY_RIGHT TOP_WALL F32.49 F33.49 F34.49 F34.49 	Basic Settings Boundary Details Sources Plot Options Flow Regime Image: Constraint of the section of the s	

Obr. 6.38 Definování okrajové podmínky Inlet

1) Basic Settings (hlavní nastavení)

Boundary Type – zde provedeme volbu typu okrajové podmínky, *Inlet* (vstup), *Outlet* (výstup), *Symmetry* (symetrie), *Wall* (stěna) atd. Seznam dostupných typů okrajových podmínek vyvoláme tlačítkem ✓. Jedná se o vstup, zvolíme tedy položku *Inlet*. Location – volba povrchové entity výpočtové oblasti, na níž bude definován vstup.

volba povrchové entity výpočtové oblasti, na níž bude definován vstup.
 Tlačítkem vyvoláme seznam všech ploch, které existují v dané výpočtové oblasti (během tvorby sítě byly již plochy interně pojmenovány). Ze seznamu zvolíme tedy plochu *INLET*.

2) Boundary Details (detailní nastavení)

- Flow Regime zde se definuje typ proudění (Podzvukové (*Subsonic*) nebo Nadzvukové (*Supersonic*) a kombinace obou zmíněných (*Mixed*)). Jedná se o podzvukové proudění, tedy zvolíme tedy položku *Subsonic*.
- Mass And Momenum zde se definují fyzikální vlastnosti a okrajové podmínky v položce Option
 volba způsobu definování vstupu. V našem případě zvolíme položku Normal Speed (vektor rychlosti kolmý na rovinu s okrajovou podmínku). V následujícím poli (to se mění podle předcházející volby) definujeme hodnotu rychlosti 0.01 m/s. Tlačítkem můžeme vyvolat seznam jednotek rychlosti, které jsou k dispozici. Program CFX provádí vnitřní rozměrovou kontrolu jednotek, proto je nutné vždy zkontrolovat, jakou jednotku volíme.

Po nastavení potvrdíme volbu tlačítkem *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Po potvrzení okrajové podmínky se Ve stromu objeví nová položka *Inlet* a současně se v grafickém okně objeví šipky na výpočtové oblasti, které označují vstup do oblasti, viz Obr. 6.39.



Tímto máme tedy definovánu vstupní okrajovou podmínku (plochu, kterou kapalina vstupuje do oblasti). Obdobným postupem budeme definovat ostatní okrajové podmínky. Pokračovat budeme s výstupní okrajovou podmínkou, tedy plochou, z níž bude tekutina vystupovat. Definování spustíme opět ikonou ikonou Jako pojmenování zvolíme *Outlet* a potvrdíme *OK*. Zvolíme typ podmínky *Outlet* a umístění okrajové podmínky na ploše *OUTLET*. Proudění je na výstupu subsonické a tlak je dle zadání 0 Pa, viz Obr. 6.40.

🔠 Insert Boundary	Outline Bound	dary: Outlet	×	Outline Boundary: Ou	tlet	×
Name Outlet	Basic Settings	Boundary Details Source	s Plot Options	Details of Outlet in Fluid in Basic Settings Bound	Flow Analysis 1	Plat Options
PK Cancel	Boundary Type	Outlet	•	Flow Regime	Sources	
	Location	OUTLET	▼	Option	Subsonic	•
	Coord Fram	ne	±	Mass And Momentum		
				Option	Average Static Pressure	•
				Relative Pressure	0 Pa	- I
				Pres. Profile Blend	0.05	
				Pressure Averaging		
				Option	Average Over Whole Outle	at ▼

Obr. 6.40 Definování okrajové podmínky Outlet

Po potvrzení nastavení se opět modifikuje strom simulace a v grafickém okně se zobrazí výstupní okrajová podmínka ve formě šipek vystupujících z oblasti.



Obr. 6.41 Zobrazení okrajové podmínky Outlet ve stromu a v grafickém okně

Jelikož je výpočet definován jako 2D, je nutné definovat dvě boční stěny, které představují plochy, jimiž byla výpočtová oblast oddělena ze skutečné reálné 3D oblasti. Těmto okrajovým podmínkám se říká symetrie a budou tedy dvě. Pro názornost je budeme označovat Symmetry_Left a Symmetry_Right. Okrajová podmínka Symmetry neumožňuje žádné nastavení, jde tedy pouze o její vytvoření, pojmenování a potvrzení umístění. Nastavení levé symetrie je zobrazeno na Obr. 6.42.

😰 Insert Boundary	Outline Boundary Details of Symmetry	y: Symmetry_Left _Left in Fluid in Flow Analysis 1
Name Symmetry_Left	Basic Settings	
OK Cancel	Boundary Type	Symmetry 👻
	Location	SYMMETRY_LEFT

Obr. 6.42 Definování okrajové podmínky Symmetry Left

Po potvrzení obou symetrií se opět modifikuje strom simulace a v grafickém okně se zobrazí okrajová podmínka symetrie na obou bočních stěnách ve formě červených šipek, které znázorňují rovinu zrcadlení.



Obr. 6.43 Zobrazení okrajové podmínky Symmetry Left a Right ve stromu a v grafickém okně

Nyní nám zbyla okrajová podmínka *Fluid Default*. V této podmínce jsou veškeré plochy, které jsme do této chvíle nedefinovali. Tato podmínka je standardně definována jako hladká stěna bez přestupu tepla (dokonale izolovaná). V našem případě je úloha bez přestupu tepla, takže není nutné podmínku definovat (případně ji můžeme přejmenovat stejně jako výpočetní oblast). Samotná podmínka stěna se v grafickém okně nezobrazuje. Tímto máme definovány okrajové podmínky nezbytné pro plnou definici úlohy.

□ Inicializece úlohy

Každou úlohu je nutné před výpočtem inicializovat, to znamená do výpočtové oblasti definovat počáteční podmínku, která je nezbytná pro spuštění úlohy. Inicializaci provedeme kliknutím na ikonu teo. Po té se v pracovním okně zobrazí inicializační panel. Inicializovat je nezbytné všechny počítané veličiny. Pro jednoduché úlohy (náš případ), je možné ponechat automatické inicializace a potvrdit volbu *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Pro urychlení konvergence (urychlení řešení) inicializujeme úlohu. Pro rychlost ve směru X (*u*) nastavíme hodnotu 0.005 m/s (poloviční hodnota vstupní rychlosti) ostatní složky ponecháme nulové. Tlak inicializuje podle výstupní okrajové podmínky, nastavíme tedy 0 Pa. U složitějších úloh je nutné definován veličiny číselně nebo vzorcem.



Obr. 6.44 Zobrazení inicializace

Nyní zbývá ještě definovat nastavení řešiče. Definování provedeme kliknutím na ikonu 🖄. Následně se v pracovním okně zobrazí základní okno se standardním nastavením, viz Obr. 6.45.

Outline So	olver Contro	1		×	3
etails of Solv e	er Control	n Flow Analysis 1			
Basic Setting	gs Equat	ion Class Settings	Advanced Options		
Advection S	Scheme			_	
Option	[High Resolution	•		
Convergence	ce Control			31	e Miloret-Otker college Re fat Search Jack Reine D C R Search Search Reine Search Sea
Min. Iteration	ns	1			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Max. Iteratio	ons	100			Advices Solver
-Fluid Times	scale Control		8	61	Convegore Contral No. Nations I No. Investore 100 No. Investore 100 No. Investore 100
Timescale C	Control	Auto Timescale	•	-	Traditional Carlor Alta Transfer • Information • Informati
Length Scal	le Option	Conservative	•		Treach Actar 10 Conserver Others Conserver Others
Timescale F	actor	1.0			Read hype View View View View View View View Vie
	mum Timesca	ale	ŧ		Defenuel Control E 0 0.0000 (m) 4
Convergence	ce Criteria				
Residual Type	e (RMS	•		
Residual Targ	get	1.E-4			
Conser	rvation Targ	et	Đ	Б	
Elapsed	d Wall Clock	Time Control	Œ	-	
E Interru	pt Control		Đ	-	
	pr conta or		_	-	

Obr. 6.45 Nastavení řešiče

U tohoto jednoduchého příkladu budeme měnit pouze počet iterací a ostatní volby ponecháme. Basic Settings (hlavní nastavení)

Advection Scheme	- zde provedeme volbu typu advekčního schématu Upwind (první řád), High
	Resolution (druhý řád), Specified Blend Factor (definice mezi prvním a
	druhým řádem). Ponecháme standardní nastavení High Resolution.
Min. Iteration	- zde nastavujeme minimální počet iterací, pro tento výpočet postačí počet
	ponechat původní hodnotu 1.
Max. Iteration	- zde nastavujeme maximální počet iterací, pro tento výpočet postačí počet
	iterací 100.
Timescale Control	- zde definujeme časové měřítko výpočtu. Auto Timescale (automatický
	odhad), Local Timescale (definice časového měřítka v poměru velká oblast-
	malý detailní vír), Physical Timescale (manuální definování fyzikálního
	časového měřítka). V našem případě ponecháme volbu Auto Timescale.
Length Scale Option	- zde definujeme délkové měřítko výpočtu. Conservative (mírný odhad),
	Aggressive (agresivní odhad), Specified Length Scale (manuální definování
	délkového měřítka). Ponecháme volbu Conservative.
Time Scale Factor	– zde definujeme poměr mezi časovým měřítkem v tekutině a pevné látce.
	V naší úloze nemodelujeme přestup tepla ve stěně, takže tato volba je
	irelevantní a ponecháme tedy původní nastavení.
Residual Type	- zde určujeme, jakým způsobem se bude definovat chyba výpočtu. RMS
	(chyba je definována střední kvadratickou odchylkou), MAX (v oblasti je
	hledána maximální chyba). Běžně se používá definice RMS, proto
	ponecháme tuto volbu

 zde definujeme přesnost výpočtu (hranici pro konvergenci úlohy). Pro běžné inženýrské úlohy se doporučuje přesnost 1E-4, pro rychlý odhad 5E-4, a pro vědecké výpočty 1E-5. Pro náš výpočet bude dostatečná přesnost 1E-4

Ostatní položky jsou momentálně nepodstatné a budeme se jimi zabývat postupně v ostatních řešených příkladech. Nastavení potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*.

Nastavením řešiče je úloha plně definována, nastavenou úlohu uložíme pomocí ikony \blacksquare . Preprocesor tedy můžeme ukončit příkazem *File* \rightarrow *Quit*. V prostředí *Workbench* se po definování úlohy, která neobsahuje žádnou chybu, změní původní symbol na zelené "zatržítko".



Obr. 6.46 Změna položky Setup po definování úlohy



Residual Target

Animaci si může student zobrazit

- odkazem ANIMACE
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var1\ soubor Priklad1_var1_Video4.exe

6.5 ITERAČNÍ ŘEŠENÍ CFD SIMULACE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

|--|

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• spustit program CFX-Solver.



D Popis CFX -Solver

Definované úlohy se řeší v samostatném modulu *CFX-Solver*, který můžeme spustit manuálně pomocí ikony Solution v projektu, nebo je spuštěn automaticky v programu Workbench.



Obr. 6.47 Grafické rozhraní modulu CFX-Solver

Grafické rozhraní obsahuje tyto základní prvky:

Textové menu - obsahuje veškeré příkazy, které je možné v *CFX-Solver* spustit (příkazy je možné z 90% spustit pomocí ikon z ikonového menu).

Ikonové menu - obsahuje ikony, které slouží pro spuštění většiny příkazu.

Grafické okno – zde je zobrazen grafický průběh reziduálů.

Textové okno – zde je zobrazen textový výpis běhu programu

1 😤	*) 😤 😤 📝 🖫 🔯 🔛 🔛 🖷 📽 🖤 🕨 🔚 🔛 🖉 🗱 🗙 🗙						
	Definice úlohy v řešiči.						
100 B	Definice pracovního adresáře pouze pro řešení úlohy.						
S.	Zobrazení reziduálů z výsledkového souboru *.res.						
4	Editování definičního souboru *.def v textovém režimu, není nutné spouštět CFX-Pre.						
t.	Export výsledků do specielních souborů MSC Partan atd.						
t d a	Interpolace výsledků.						
ŝ	Nastavení pracovní plochy.						
1	Definování nového grafu v grafickém okně.						
纽	Přepínání mezi jednotlivými vzhledy řešiče.						
	Nastavení uspořádaní oken v řešiči.						
	Načtení uživatelem definovaného nastavení oken v řešiči.						
STOP	Zastavení řešení a zapsání výsledkového souboru *.res.						
*	Restart řešení (pokračování v řešení).						
	Zapsání plného výsledkového souboru během řešení do záložního souboru *.bak.						
×	Editování právě řešené úlohy v textovém režimu bez nutnosti přerušení řešení.						
ď	Editování výsledků.						
RMS	Zobrazení rezidualů ze střední kvadratické hodnoty chyby.						
MAX	Zobrazení rezidualů z maximální hodnoty chyby.						

V následující tabulce je uveden stručný popis ikon v CFX-Solver a jejich funkce

Automatické spuštění iteračního řešení CFD simulace

Úlohu jsme kompletně nastavili v *CFX-Pre*, proto nemusíme v *CFX-Solver* provádět žádné nastavení. Řešení je možné spustit v prostředí *Workbench*, program *CFX-Solver* je pak spuštěna na pozadí bez grafického výstupu. Ve *Workbench* je aktuální stav řešení zobrazován prostřednictvím procesního ukazatele. Řešení můžeme spustit dvěma způsoby

- V programu Workbench klikneme na ikonu [≁] Update Project</sup>.
- V projektu vybereme položku Solution . Pravým tlačítkem myši vyvoláme kontextové menu a v něm klikneme na ikonu Vpdate.

Oba postupy jsou zobrazeny na Obr. 6.48

V obou případech je na pozadí automaticky spuštěn program *CFX-Solver*. V položce Solution se pak změní symbol \gtrless na symbol \oiint . To symbolizuje, že úloha je právě řešena. Postup řešení je také zobrazen prostřednictvím "*Progress Bar*" symbolu viz Obr. 6.49. Po dosažení požadované přesnosti 1E-4, nebo po provedení 100 iteračních kroků, se běh úlohy ukončí a výsledky se zapíší. Po ukončení řešení se symbol změní z \oiint , na \checkmark , což symbolizuje, že řešení je ukončeno a soubor s výsledky je uložen a program *CFX-Solver* ukončen. Samotný průběh řešení je možné sledovat v grafickém okně, které si můžeme vyvolat prostřednictvím kontextového menu, které vyvoláme pravým tlačítkem v položce Solution . V menu vybereme položku Display Monitors. Následně je spuštěno grafické rozhraní programu *CFX-Solver* viz Obr. 6.47. Grafické rozhraní je možné kdykoli vypnout příkazem *File*—*Quit* a znovu zobrazit Display Monitors . Zobrazení grafického okna totiž nemá žádný vliv na řešení. Pouze v případě, že je při ukončení řešení zobrazeno grafické rozhraní *CFX-Solver* je nutné potvrdit ukončení řešení a zapsání souboru s výsledky viz Obr. 6.52. Dále je vhodné vypnout grafické

rozhraní příkazem $File \rightarrow Quit$, protože je již nebudeme dále využívat. Tím je ukončen proces řešení a můžeme přejít k dalšímu kroku, který spočívá v analýze výsledků.



Obr. 6.48 Způsoby automatického spuštění CFX-Solver

	Ander 1: Workshow) Re See The Use Th	Extension in the first input input in the input input in the input	zualizace procesu řešení
	T view Af Cathonie. ↓ opdang.	Balan Balan Bolang Delaka Balang Bala	Progress Bar
ogress	5		_ ×
•	A	В	с
1	Status	Details	Progress
2	Updating the Solution cell in Schod	Solving	0

Obr. 6.49 Vizualizace procesu řešení ve Workbench



Obr. 6.50 Změna položky Solution po ukončení řešení



Obr. 6.51 Spuštění grafického rozhraní CFX-Solver

o Solv	er Run Finished Normally	8 X
1	Schod_001 has completed normally. Run concluded at: pá 16. IV 08:23:41 2010 Results are in C:\Users\Katka\Documents\Priklad1_5376_Working\dp0\CFX\CFX\Work1\Schod_001.res	
Open t	nis workspace now	
	<u> </u>	

Obr. 6.52 Potvrzení ukončení řešení

Manuální spuštění iteračního řešení CFD simulace

Manuálně je možné program CFX-Solver spustit dvojklikem na položku 🗐 Solution . Po spuštění řešiče se zobrazí okno, ve kterém je nastavena cesta do pracovního adresáře a cesta k definičnímu souboru, který byl automaticky zapsán CFX-Pre. Žádné položky není nutné editovat. Popíšeme si však základní položky při spouštění řešení úlohy.

Define Run (definice běhu řešiče)

Solver Input File	– zde nastavíme cestu k zapsanému definičnímu souboru (cesta je nastavena automaticky a není možné ji měnit při spuštění <i>CFX-Solver</i> v programu <i>Workbench</i>)
Initialisation Oprion	– zde nastavíme soubor s předchozím řešením. Pokud je zde nastavena cesta k souboru s řešením, je vynechána inicializace. Tato položka je automaticky definována při spuštění <i>CEX Solver v</i> programu <i>Workhench</i>
Type of Run	 typ řešiče, (<i>Full</i> (plný běh úlohy), <i>Partitioner Only</i> (pouze dělení oblasti pro paralelní řešič)). Tuto položku není možné definovat při spuštění <i>CFX</i>-Solver v programu Workbanch.
Double Precision	 – zde je možné zapnout dvojitou přesnost řešení (řešení na dvojnásobný počet desetinných míst). Tato volba se nejčastěji využívá u složitých a pokročilých simulací
Run Mode	 zde definujeme, jakým způsobem budeme řešit úlohu Serial (řešení na jednom procesoru lokálně), Local Parallel (paralelní řešení na více procesorech), Distributed Parallel (paralelní řešení na vzdáleném pročesorech), Distributed Parallel (paralelní řeš
Show Advanced Con.	 – zaškrtnutím této položky se zobrazí další záložky se speciálními volbami. Tyto položky se využívají při řešení pokročilých úloh, proto se jimi nebudeme zabývat.
Řešení úlohy spustíme t přesnosti 1E-4, nebo po p	lačítkem <i>Start Run</i> a tím se spustí řešení úlohy. Po dosažení požadované provedení 100 iteračních kroků, se běh úlohy ukončí a výsledky se zapíší do

výsledkového souboru. Ukončení běhu úlohy je oznámeno prostřednictvím okna, viz Obr. 6.52, stejně jako při spuštění *CFX-Solver* prostřednictvím *Workbench*. Ostatní kroky jsou identické s automatickým spuštěním

Run Definition	Partitioner	Solver	Interpolator	
Initialization Optio	on Current	t Solution D	ata (if possible ·	▼
Type of Run	Full			•
Double Precis	sion ment			
Run Mode	Serial		•	•]
NOTEBOOK-PC				
Partition Weight	ing mode is set	to Automat	ic.	

Obr. 6.53 Definice úlohy v CFX-Solver.

ANIMACE

Animace jsou v této kapitole dvě. Automatické spuštění řešení CFD simulace si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var1\ soubor Priklad1_var1_Video5a.exe

Manuální spuštění řešení CFD simulace si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var1\ soubor Priklad1_var1_Video5b.exe

6.6 ANALÝZA VÝSLEDKU



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

|--|

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• analyzovat výsledky CFD simulace v programu CFD-Post.



Popis CFD -Post

Výsledky vyřešené úlohy se vyhodnocují v samostatném modulu CFD-Post, který spustíme dvojklikem na položku 🥩 Results . Po editování této položky je automaticky spuštěn program CFD-Post viz Obr. 6.54



Obr. 6.54 Grafické rozhraní programu CFD-Post

Grafické rozhraní obsahuje tyto základní prvky:

Textové menu - obsahuje veškeré příkazy, které je možné v CFD-Post spustit (příkazy je možné z 90% spustit pomocí ikon z ikonového menu).

Ikonové menu - obsahuje ikony, které slouží pro spuštění většiny příkazu.

Ikony pro definici pohledů, pohybů a výběrů - obsahuje ikony, které slouží pro grafické operace, tedy zvětšení, zmenšení, rotace, posuv, pohled atd.

Grafické okno – jsou zde zobrazeny výsledky, obrázky, grafy apod.

Pracovní okno – zde je zobrazen strom (*tree*) vyhodnocení, tedy položky definované ve vyhodnocení. Každou položku je možné editovat dvojklikem. Po dvojkliku se v pracovním okně objeví panel pro podrobnou definici dané položky stromu.

V následující tabulce je uveden stručný popis ikon v *CFD-Post* a jejich funkce

😤 🕰 🔩 🖄 🔟 🤊 💌 🕅) Location - 🕫 🐻 📚 💉 🏕 📑 🔣 ⊄ 💽 🗶 🐻 🎟 🖄 🙆 🐨 🖉 🖉 🕮 🖓 🖉 🕷 🗵
	Načtení výsledkového souboru *.res, *.bak.
[™]	Načtení souboru s definovanými rovinami a obrázky *.cst.
G eo	Uložení definovaných rovin a obrázků do souboru *.cst.
01	Tisk výsledků.
90	Krok vpřed, zpět.
🔂 Location 👻	Definice entit – objemy, plochy, křivky, přímky, body, skupina bodů, atd.
the	Vytvoření vektorového pole.
5	Vytvoření konturovaného obrázku.
((0))	Vytvoření proudových čar.
110	Vytvoření trajektorií částic.
ABC	Text.
声	Vytvoření nového souřadného systému.
321	Vytvoření barevné škály.
	Zrcadlení entit.
	Omezení plochy.
X	Vytvoření nové veličiny složené ze základních veličin.
Va	Vytvoření rovnice.
	Vytvoření tabulky – obdobná práce jako v MS Excel.
ici	Vytvoření grafu.
A	Poznámka, komentář.
Ø	Kompilace obrázku.
G	Výběr řešení pro daný časový krok u časově závislé úlohy.
	Tvorba animace.
4	Rychlá editace.
P	Určení hodnoty v bodě.
f	Funkční kalkulačka.
M	Makro kalkulačka.
	Vlastnosti výpočetní sítě.
2	Textový editor.

D Tvorba vyhodnocovacích rovin

Abychom mohli vyhodnocovat výsledky, je nutné nejprve vytvořit vyhodnocovací entity (roviny, přímky, atd.). Pro vyhodnocení proudového pole je možné využít obě okrajové podmínky symetrie (*Symmetry Left, Symmetry Right*). My si ale z cvičných důvodů vytvoříme rovinu, která bude procházet středem výpočetní oblasti. Nejprve tedy vyvoláme menu pro tvorbu geometrických entit pomocí ikony blocation . Výsledné menu obsahuje všechny entity, které je možné vytvořit. Zvolíme

tedy položku rovina (*Plane*), následně pojmenujeme plochu (v našem případě ponecháme výchozí pojmenování *Plane 1*, ale můžeme použít libovolný název) a potvrdíme volbu tlačítkem *Ok*. V pracovním okně se objeví panel pro definování roviny Obr. 6.55.

÷	Point				
**	Point Cloud		Details of Plane	e 1	
/	Line		Geometry	Colour Render View	
	Plane				
\bigcirc	Volume	S Insert Plane	Domains	All Domains 👻	
6	Isosurface		Definition		
1	Iso Clip	Name Plane 1			
7	Vortex Core Region		Method	XY Plane 👻	
۳	Surface of Revolution	OK Cancel		5	
\sim	Polyline		z	0.005 m 👻	
4	User Surface				
8	Surface Group		Plane Bounds	s - None	Ð
8.	Turke Surface		CPlane Type -	Slice	H
0	Turbo Surrace				
r	Turbo Line				

Obr. 6.55 Vytvoření roviny

Geometry (definice plochy)

 – zde volíme, zda má plocha procházet všemi oblastmi či některými. V našem případě je pouze jedna oblast, proto tuto volbu nemá význam změnit.

Method

Domains

případě je pouze jedna oblast, proto tuto volbu nemá význam změnit. – zde volíme způsob definice plochy. Existuje několik možností, např. roviny rovnoběžné se základním souřadným systémem XY, XZ, YZ, definice třemi body, definice bodem a normálou roviny. V našem případě volíme rovinu XY a vzdálenost Z = 0.005m.

Po provedení nastavení potvrdíme volbu tlačítkem *Apply*. Ve stromu vyhodnocení by se měla objevit nová položka pojmenovaná *Plane 1* a výpočtová oblast by měla být vyplněná šedou barvou, viz Obr. 6.56.



Obr. 6.56 Zobrazení vytvořené roviny Plane 1

U každé entity je v levé části zobrazena symbol v se zaškrtnutým polem. To znamená, že daná entita je zobrazena. Jakoukoli entitu je možné zobrazit zaškrtnutím tohoto políčka a naopak. Vyhodnocovací rovinu tedy nebudeme dále zobrazovat. Pokud máme definovanou rovinu, můžeme vyobrazit na vytvořené ploše libovolnou veličinu nebo vektorové pole.

Vytváření konturovaných obrázků

Vyhodnocení započneme vytvořením pole střední rychlosti. Pole střední rychlosti vytvoříme kliknutím

na ikonu $\boxed{0}$, následně ponecháme výchozí pojmenování *Contour 1* (pojmenování může být libovolné) a potvrdíme tlačítkem *Ok*. V pracovním okně se objeví panel pro definování vlastností konturovaného obrázku, viz Obr. 6.57

	Geometry	Labels	Render	View		
	Domains	All Doma	ains		•	
	Locations	Plane 1			•]
	Variable	Velocit	y		•	
insert Contour	Range	Global			•	
Name Contour 1	Min			0) [m s^-1]	
Cancel	Мах		0	.0136282	2 [m s^-1]	
	Boundary Data	•	Hybrid	\odot	Conserva	tive
	Colour Scale	Linear			•	
	Colour Map	Defaul	t Colour Maj	p	•	B
	# of Contours	11			×	-
	Clip to Rang	je				

Obr. 6.57 Vytvoření konturovaného obrázku rychlostního pole

Geometry (definice obr	ázku)
Domains	- zde volíme, zda má obrázek vyhodnocovat data ze všech oblastí V našem
	případě je pouze jedna oblast, proto tuto položku nemá význam měnit.
Location	– zde volíme, na které entitě budeme vytvářet konturovaný obrázek. V našem
	pripade na nami vytvorene rovine Plane 1.
Variable	– zde volíme, jakou veličinu budeme vyhodnocovat. V našem případě chceme
	vytvorit pole stredni rychlosti, proto zvolime polozku <i>Velocity</i> .
Range	- zde volíme rozsah, tedy min. a max. hodnotu v barevné škále. Existují
	celkem čtyři možnosti, tj. 1) Global – min. a max. hodnota se určí z celé
	výpočetní oblasti, 2) Local - min. a max. hodnota se určí z hodnot dané
	roviny, 3) User Specified – min. a max. hodnotu určí uživatel, 4) Value List
	– uživatel definuje přímo hodnoty, které se zobrazí v barevné škále. My tedy
	ponecháme volbu Global.
Colour Scale	- zde volíme, jak bude zobrazena barevná stupnice. Na výběr je lineární
	(Linear) a logaritmická (Logarithmic) stupnice. Ponecháme lineární stupnici.
Colour Map	- zde definujeme barevné schéma. Existuje celá řada možností. Nejčastěji se
-	používá schéma Rainbow (barvy duhy - modrá až červená), Rainbow6 (modrá
	až fialová) a Greyscale (černobílá). V našem případě ponecháme barevné
	schéma Rainbow.
# of Colours	– zde definujeme barevné schéma, opět existuje zde celá řada možností.
	Nejčastěji se určuje počet úrovní barevné škály v rozmezí 10-25 úrovní. Zde
	ponecháme volbu 10.
	<u>^</u>

Po provedení nastavení potvrdíme volbu tlačítkem *Apply*. Současně by se měla Ve stromu objevit nová položka se jménem *Contour 1* a v grafickém okně by se mělo zobrazit pole střední rychlosti.



Obr. 6.58 Zobrazení vytvořeného pole střední rychlosti

Naprosto stejným postupem vytvoříme pole statického tlaku. Jméno obrázku bude *Contour 2* a proměnná bude *Pressure*. Nyní můžeme kdykoli přepínat mezi zobrazeními pole statického tlaku a střední rychlosti pouhým zaškrtnutím dané položky. Aby se oba obrázky vzájemně nepřekrývaly, potlačili jsme zobrazení pole střední rychlosti, viz Obr. 6.59.



Obr. 6.59 Zobrazení vytvořeného pole statického tlaku

Vytváření vektorových polí

Další důležitou částí vyhodnocení je vektorové pole. Vektorové pole vytvoříme stejně jako konturované obrázky na vytvořené rovině (*Plane 1*). Postup bude opět obdobný. Vektorové pole vytvoříme pomocí ikony $\stackrel{\bullet}{\rightarrow}$. Následně ponecháme jméno položky *Vector 1* (pojmenování může byt opět libovolné) a potvrdíme volbu tlačítkem *Ok*. V pracovním okně provedeme definici vektorového pole.

insert Vector	? ×
Name Vector 1	
ОК	Cancel

	Geometry C	Colour Symbol Render View
l	Domains	All Domains 👻 📖
	Definition	
	Locations	Plane 1
	Sampling	Vertex 👻
	Reduction	Reduction Factor 👻
	Factor	2
	Variable	Velocity 🔹 🛄
	Boundary Data	Hybrid
	Projection	None
Symbol	Line Arrow	•
Symbols Size	0.1	

Vormalize Symbols

Obr. 6.60 Vytvoření vektorového pole

Geometry (definice vektorového pole)

Domains	- zde volíme, zda má obrázek vyhodnocovat data ze všech oblastí. V našem
	případě je pouze jedna oblast proto tuto nemá význam měnit.
Location	- zde volíme, na které entitě budeme vytvářet vektorové pole. V našem
	případě na námi vytvořené rovině Plane 1.
Sampling	- zde volíme vzorkování, tj. ze kterých hodnot se bude určovat velikost
	vektoru. Existuje opět celá řada metod, my ponecháme volbu Vertex (hodnoty
	jsou určeny z geometrického středu elementů sítě).
Reduction	– zde volíme, jakým způsobem se bude snižovat počet zobrazených vektorů.
	Položku ponecháme v původním nastavení.
Factor	– zde určíme redukční faktor zobrazení. V našem případě volíme 4, tj. zobrazí
	se každý čtvrtý vektor.
Variable	- zde volíme veličinu, ze které se bude určovat absolutní velikost vektoru a
	směr. Položku nebudeme měnit.
Projection	– zde definujeme způsob projekce vektorů do plochy. Tuto položku nebudeme
	měnit.
Colour (barva vektorů)	
Mode	– zde volíme, zda mají být vektory obarveny vybranou veličinou či má být
	barva konstantní.
Variable	– zde volíme veličinu, ze které se bude určovat absolutní velikost vektoru a
	směr. Položku nebudeme měnit.
Range	– zde volíme rozsah, tedy min. a max. hodnotu v barevné škále. Existují
e	celkem čtvři možnosti, tj. 1) Global - min. a max. hodnota se určí z celé
	výpočetní oblasti 2) Local – min. a max. hodnota se určí z hodnot dané roviny
	3) User Specified – min. a max. hodnotu určí uživatel 4) Value List – uživatel
	definuje přímo hodnoty, které se zobrazí v barevné škále. My tedy ponecháme
	volbu <i>Global</i> .
Colour Scale	- zde volíme, jak bude zobrazena barevná stupnice. Na výběr je lineární
	(<i>Linear</i>) a logaritmická (<i>Logarithmic</i>) stupnice. Ponecháme lineární stupnici.
Colour Map	- zde definujeme barevné schéma. Existuje celá řada možností. Nejčastěji se
*	používá schéma Rainbow (barvy duhy - modrá až červená), Rainbow6 (modrá

až fialová) a *Greyscale* (černobílá). V našem případě ponecháme barevné schéma *Rainbow*.

Symbol (vlastnosti grafického symbolu vektoru)

Symbol	– zde volíme vzhled vektoru. Máme na výběr celou řadu možností, např.
	šipka, harpuna, kužel, atd. My ponecháme standardní volbu šipka
Symbol Size	 zde upravujeme velikost vektoru v závislosti na rychlosti.
Normalize Symbols	– tato položka umožňuje vypnutí vlivu rychlosti na velikost vektoru. Všechny
	vektory budou mít stejnou velikost, měnit se bude pouze směr a barva. Tuto
	položku zaškrtneme.

Nastavení potvrdíme tlačítkem *Apply*. V grafickém okně by se mělo zobrazit vektorové pole, viz Obr. 6.61.



Obr. 6.61 Zobrazené vektorové pole

Vektorové pole si pro lepší názornost zvětšíme pomocí nástroje lupa P. Detail vektorového pole si vytvoříme v oblasti zavíření, tj. za schodem, kde se vytvořil vír viz Obr. 6.62.

utine Variables Expressions Calculators 1 +		- ?m		
0 Ø Plesh Regions Ø User Locations and Plots Ø Contaur 1 Ø Contaur 1 Ø Contaur 2 Ø Ostaut Transform Ø I Default Logond Veire 1 Ø Ø Østaut Transform Ø Østaut Logond Veire 1 Ø Østaut Logond Veire 1 Ø Østaut Logond Veire 1 Ø Østaut Logond Veire 1 Ø Østaut Logond Veire 1 Ø Østaut Logond Veire 1 Ø Østaut Logond Veire 1	Vew 1 * Velocity Vector / 1363e-002 1.022e-002		Noncomm	NNSYS
All of Vector 1 Colour Symbol Render Vers All Domains Perform Coatons Pare 1 Sanping Vertex	6.814e-003 3.407e-003		*	
Reduction Reduction Factor				Y
indexes.		0	0.300 (m)	Ŀ

Obr. 6.62 Detail vektorového pole

Z obrázku je zřejmé že vír se otáčí proti směru hodinových ručiček. Ve střední části obrazovky také vidíme bod připojení. Je to bod, kde odtržený proud tekutiny znovu přilne na stěnu. Našim dalším úkolem bude vytvoření grafu, ze kterého by bylo možné odečíst bod připojení. Z vektorového pole vidíme, že tekutina nalevo od bodu připojení proudí proti směru osy X (doleva) a naopak tekutina napravo od bodu připojení proudí ve směru osy X (doprava), takže v bodě připojení je rychlost nulová. Jelikož na stěně má vždy tekutina nulovou rychlost, musíme si vytvořit přímku, která bude ležet blízko dolní stěny, ale nebude s ní totožná. Na této přímce pak vyhodnotíme rychlost u (ve směru osy X). Bod, ve kterém bude v grafu procházet rychlost nulou, bude právě bod připojení.

Vytváření grafů

Přímku budeme definovat obdobně jako rovinu. Nejprve tedy vyvoláme menu pro tvorbu geometrických entit pomocí ikony **bocation** a zvolíme položku *Line*. Přímku je možné definovat pouze dvěma body. Přesné nastavení bodů je zřejmé z následujícího Obr. 6.63.

÷	Point		Geometry	Colour I	Render	View			
*	Point Cloud		Demains All Domains						
/	Line		Domains						
	Plane								
\bigcirc	Volume	Insert Line ? X	Method	Two Points 👻					
۶Ò	Isosurface		Point 1	0	0.01		0.005		
ø	Iso Clip	Name Line 1	Deint 2	2	0.01		0.005		
7	Vortex Core Region	OK	Point 2	0.005	505				
۳	Surface of Revolution		Line Type						
\sim	Polyline		O Cut		۹ ک	Sample			
-	User Surface		Samples	10			*		
\$	Surface Group								
20	Turbo Surface								
81	Turbo Line								

Obr. 6.63 Vytvoření přímky

Geometry (definice přímky) Domains – zo

 – zde volíme, zda má procházet všemi oblastmi. V našem případě je pouze jedna oblast, proto tuto nemá význam měnit.

Point 1,2– zde definujeme počáteční a koncový bod přímky.Samples– zde volíme, na kolik úseků bude přímka rozdělena. Tato položka souvisí
s rozlišením grafu. Nyní ponecháme výchozí hodnotu 10 bodů. Později tuto
hodnotu zvýšíme na 25.

Po provedení nastavení potvrdíme tlačítkem *Apply*. V grafickém okně by se měla zobrazit žlutá přímka u dolní stěny za schodem, viz Obr. 6.64.

	G A6 : Schod - CFD-Post	
	File Edit Session Insert Tools Help	
	😤 📽 🐂 🗹 🗐 🤊 🥐 🔯 Location + 🐗 🚮 🧙	≳ ጶ∌ 🗄 광 🗭 🛎 🖾 🖮 🙆 🐨 🖉 🐨 🖉 🖬 🖬 🖬 🖬
	Outline Variables Expressions Calculators 1 +	∿ 5∻QQQ @ □ - 1
	See Locations and Plots	View1 *
4 🔞 User Locations and Plots	Contour 2	
🔲 👩 Contour 1	Default Legend View 1 E	Noncommercial use only
Contour 2	■ av Vector 1 V ∰ Wireframe	
🗗 Default Transform	Details of Line 1 Geometry Colour Bender View	
👿 📑 Pefault Legend View 1	Domains Al Domains 👻	
📝 🖊 Line 1	Method Two Points	
🔲 🔯 Plane 1	Point 1 0 0.01 0.005 Point 2 3 0.01 0.005	<u> </u>
🔲 🞝 Vector 1	Line Type	
📝 🗇 Wireframe	Samples 10	
	I	
		0 1.000 (m)
		0.500
	Apply Reset Defaults	30 Viewer Table Viewer Chart Viewer Comment Viewer Report Viewer

Obr. 6.64 Zobrazení vytvořené přímky Line 1

Jestliže je vytvořena přímka, můžeme následně vytvořit graf. Graf vytvoříme pomocí ikony. Ponecháme pojmenování *Chart 1* a volbu potvrdíme.

Ware Chart 1 Type XY Ware Chart 1 Ware Chart 1 Ware Chart 2 Ware Chart 1 Ware Chart 3 Ware Chart 1 Ware Chart 3 Ware Chart 3 Ware 3 Ware Chart 3 Ware 3 Ware 3
Title Title Report Caption Fast Fourier Transform E General Data Series X Axis Y Axis Line Disple General Data Series X Axis Y Axis Line Disple Data Selection General Data Series Variable Yelocity u Wirid Conservative
General Data Series X Axis Y Axis Line Disple General Data Series X Axis Y Axis Line Disple Data Selection General Data Series X Axis Y Axis Line Disple Variable X Y Y Y Specify data series for locations, files or expressions Series 1 (Line 1) Yriable Yelocity u Image: Series 1 (Line 1) Yelocity u
General Data Series X Axis Y Axis Line Disple General Data Series X Axis Y Axis Line Disple Data Selection General Data Series X Axis Y Axis Variable X Image: Conservative Series 1 (Line 1) Hybrid © Conservative Conservative Conservative
General Data Series X Axis Y Axis Line Disple General Data Series X Axis Y Axis Line Disple Data Selection General Data Series X Axis Y Axis Line Disple Variable X Image: Conservative Image: Conservative Series 1 (Line 1) Series 1 (Line 1)
General Data Series X Axis Y Axis Line Displa General Data Series X Axis Y Axis Line Displa Data Selection Data Selection Data Selection Specify data series for locations, files or expressions Variable X Y Axis Welocity u Series 1 (Line 1)
Hybrid Ocnservative
Take absolute value of data points
Axis Range Axis Range
Determine ranges automatically Determine ranges automatically
Min -1.0 Max 1.0 (+) Name Series 1
Logarithmic scale Invert axis Logarithmic scale Invert axis
Axis Labels
✓ Use data for axis labels ✓ Use data for axis labels
Custom Label X Axis <units> Custom Label Y Axis <units> Custom Data Selection</units></units>

Obr. 6.65 Postup definice grafu Chart 1

General (definice typu grafu)

Title

Type

zde vepíšeme pojmenování grafu. Text může být libovolný a bude vyobrazen uprostřed nad grafem. Zde jsme ponechali standardní název *Title*.
zde volíme typ grafu. Existují dva základní typy *XY* a *Time*. Typ *XY* vyžaduje dva sloupce dat (Y=f(X)). Typ *Time* slouží pro vyjádření závislosti vybrané proměnné na čase. V našem případě ponecháme volbu *XY*.

X Axis	- zde definujeme veličinu na ose x. Jako proměnnou pro osu x zvolíme
	souřadnici X, viz Obr. 6.64.
Y Axis	- zde definujeme veličinu na ose y. Jako proměnnou pro osu y zvolíme
	rychlost ve směru osy X, tedy rychlost u (Velocity u).
Data Series	Zde definujeme entitu na, která bude sloužit jako zdroj dat pro graf. Zvolíme
	Line1.

Nastavení potvrdíme tlačítkem *Apply*. V grafickém okně by se měl zobrazit vytvořený graf, viz Obr. 6.66.



Obr. 6.66 Zobrazení vytvořeného grafu u=f(x)

Pokud zde vytvořený graf neodpovídá požadavkům uživatele, je možné exportovat data do souboru *.cst, který je možné načíst v *MS EXCEL* a podobně. Export provedeme v záložce *Data Series* pomocí tlačítka *Export*, viz Obr. 6.66. Poté již pouze pojmenujeme soubor a uložíme. Nyní můžeme znovu editovat položku *Line 1* a zvýšit původní počet vzorků z 10 na 25.



Obr. 6.67 Zobrazení vytvořeného grafu

Graf se tak vyhladí, protože se zvýší počet dat pro graf. Počet vzorků si můžeme zvýšit třeba na 100, ale vzhled grafu se již výrazně nezmění a pro tuto cvičnou úlohu je zobrazení dostatečné.

Nyní si vytvoříme v oblasti další tři vyhodnocovací přímky. Postup pro vytvoření přímek je naznačen na Obr. 6.63. Postup pro vytvoření přímky bude tedy identický, rozdílné budou pouze počáteční a koncové body jednotlivých přímek. V následující tabulce jsou souřadnice bodů a pojmenování jednotlivých přímek.

I		Bod 1	I		Počet		
Jmeno		Point 1		Point 2			vzorků
Name	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Samples
Line 2	0.5	0	0.005	0.5	0.5	0.005	25
Line 3	2	0	0.005	2	0.5	0.005	25
Line 4	3.5	0	0.005	3.5	0.5	0.005	25

Tab. 6.2. Parametry vyhodnocovacích přímek 2-4

Po vytvoření těchto přímek a jejich zobrazení by měly být ve výpočtové oblasti tři svislé přímky.



Obr. 6.68 Zobrazení vytvořené přímky Line 2-4

Na těchto třech přímkách si nyní vytvoříme rychlostní profily tak, aby bylo možné sledovat ustálení nerovnoměrného rychlostního profilu, který iniciován náhlým rozšířením.

Postupem znázorněným na Obr. 6.65 vytvoříme graf 2 (Chart 2). Nejprve v záložce *Data Series* vytvoříme pomocí ikony itři datové řady (*Series*) pro přímky 2-4. Na ose x je definována souřadnice Y a na ose y je *rychlost u*, tedy podélná složka rychlosti, a potvrdíme *Apply* viz Obr. 6.69. Na obrázku Obr. 6.70 je zobrazen výsledný graf se třemi rychlostními profily. Z grafu je patrné ustálení rychlostního profilu po jeho deformaci vlivem náhlého rozšíření. Rychlostní profil znázorněný červenou křivkou je definován těsně za schodem. Je zde vidět záporná složka rychlosti, což signalizuje zpětné proudění a vznik vírů za náhlým rozšířením (zřetelné také z vektorového pole, viz Obr. 6.62). Rychlostní profil znázorněný modrou křivkou je definován ve větší vzdálenosti a je již relativně ustálen, ale je zde ještě vidět určitá nerovnoměrnost u horní stěny. Rychlostní profil, znázorněný zelenou barvou, je definován v oblasti výstupu a je již zcela ustálen a odpovídá teoretickému parabolickému profilu u laminárního proudění.

General Data Series X Axis Y Axis Line Display Chart	General Data Series X Axis Y Axis Line Display Charl
Specify data series for locations, files or expressions	Data Selection
Series 1 (Line 2)	Variable Y
Series 2 (Line 3)	
×	Take absolute value of data points
D.	Avis Range
*	Determine ranges automatically
Name Series 3	Min -1.0 Max 1.0
Data Source	
Location Line 4	Logarithmic scale Invert axis
	Axis Labels
O File	Use data for axis labels
Custom Data Selection	Custom Label X Axis <units></units>
4	
General Data Series X Axis Y Axis I	Line Display Chart
Data Selection	
Variable Velocity u	
World Conserva	uve
Axis Range	
🔽 Determine ranges automatically	
Min -1.0 Max 1.0	
Logarithmic scale	is
Axis Labels	
Use data for axis labels	
Custom Label Y Axis <units></units>	
Obr. 6.60 Postun defin	ico grafu 2
	ice grain 2
A6 : Schod - CFD-Post	
File Edit Session Insert Tools Help	
	■ E A ● O □ # / 1 ♥ ♥ ₩ E
Vourie Vanacies Expressions Calculators Iurbo A Chart 2	
Contour 1	Title
B. Default Transform 0,014 ↓ Default Legend View 1 =	
Line 1 0,012	
- Line 3	
0,01	
General Data Series X Axis Y Axis Line Display Chart	
Data Selection	
Variable Velocity u 👻 🔒 0,006 -	



Obr. 6.70 Postupné rychlostních profilu na přímkách Line 2-4

Tvorba grafických výstupů

Jakýkoli grafický výstup je možné v *CFD-Post* vytvořit pomocí příkazu *File* →*Save Picture*. Tato ikona umožňuje vytvořit obrázek, který je právě zobrazen v grafickém okně (print screen).

3) A	6 : Schod - CFD-Post		Save Pictur	re			
File	Edit Session Insert	Tools He	Options	S.			
f	Load Results	Ctri+L	File	Schod.png			
100 B	Load State Save Project	CHI+O	Format	PNG 👻			
	Refresh		White Ba	ackground			
a 1	Import		Use Screen Size				
PF:	Export		Width 6	00 🔶 Height 600 🐥			
٨	ANSYS Import/Export						
	Report		Scale (%)	100			
1	Save Picture	CHI+P	Image Qualit	ty 80			
	Recent Results Files		Tolerance	0.0001			
	Recent State Files						
	Quit	CHI+Q	Sa	Cancel			

Obr. 6.71 Obrazovka pro grafický tisk obrázků

Nastavení	
File	 zde volíme cestu, kde bude obrázek uložen a jeho jméno. Standardně jde o pracovní adresář.
Format	– zde můžeme zvolit formát pro grafický výstup. K dispozici jsou standardní formáty, jako např. jpeg, bmp, tif, png atd
Use Screen Capture	– toto políčko umožní prostou kopii obrazovky, tak jak je aktuálně zobrazena.
White Background	– zde můžeme zapnout bílé pozadí obrázku. Bez této položky je využito standardní bělomodré pozadí.
Enhanced Output	– tato položka umožňuje vyhlazení obrázku. Jsou tak odstraněny některé rastrové chyby.
Scale	 – zde je možné nastavit dodatkové měřítko obrázku, standardně ponecháváme 100%
Tolerance	 – tato položka definuje přesnost vykreslení obrázku.

Položky je vhodné ponechat nastavení dle Obr. 6.71, toto nastavení je optimální pro většinu textových editorů a kvalita je dostatečná i pro kvalitní tisk. Po stisknutí tlačítka *Save* se obrázek vykreslí a bude uložen do zvoleného adresáře.

Analýzou řešení a tvorbou grafických výstupu je definována poslední položka CFD projektu.

Nastavení vyhodnocovacího souboru uložíme pomocí ikony \blacksquare . *CFD-Post* pak můžeme ukončit příkazem *File* \rightarrow *Quit*. V prostředí *Workbench* se po analýze výsledků, která neobsahuje žádnou chybu, změní původní symbol na zelené "zatržítko".



Obr. 6.72 Změna položky Results po analýze výsledků

Posledním krokem bude uložení projektu v Workbench prostřednictvím ikony 🛃. Analýzou výsledků je tedy dokončena úvodní úloha. V další části se již nebudeme tak podrobně zabývat jednotlivými okrajovými podmínkami a ve značné míře se budeme odkazovat na tuto úlohu.



Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var1\ soubor Priklad1_var1_Video6.exe



Projekt soubor v programu *Workbench*. Databáze geometrií, sítí, výpočtů a výsledků technických výpočtů.

Geometry reprezentuje geometrii vytvořenou v programu Design Modeler

Mesh reprezentuje síť vytvořenou v programu Meshing.

Setup reprezentuje nastavení CFD simulace v programu CFX-Pre.

Solution reprezentuje řešení CFD simulace v programu CFX-Solver.

Results reprezentuje analýzu CFD simulace v programu CFX-Pre.



OTÁZKY Č. 6

- 1. Jaký je postup při vytváření geometrie v programu Design Modeler?
- 2. Proč je v některých případech vhodné rozdělit objem na sestavu kvádrů?
- 3. Jaký je postup při vytváření výpočetní sítě v programu Meshing?
- 4. Proč je při síťování přímek definováno zhuštění elementů u stěny?
- Proč je vytvořena 3D síť (vysunutí sítě o tloušť ce jednoho elementu), i když je úloha řešena jako 2D?
- 6. Popište stručně jak je nastavena CFD simulace v programu CFD-Pre, a co vše je nutné definovat?
- 7. Jaký je postup při iteračním numerickém řešení CFD simulace v programu CFD-Solver?
- 8. Jak je možné analyzovat výsledky v programu CFD-Post?
- 9. Jaké entity je možné vytvořit při analýze výsledků v CFD-Post?
- 10. Jaké základní grafické výsledky je možné vytvořit v CFD-Post?

7 CFD SIMULACE BEZ DATABÁZOVÉ PODPORY WORKBENCH

7.1 VYTVOŘENÍ SÍTĚ V PROGRAMU ICEM CFD



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vytvořit geometrii v programu ICEM CFD.
- vytvořit výpočetní síť v programu ICEM CFD.
- exportovat síť do souboru, který je použitelný v programu CFX-Pre.



Popis úlohy

V této kapitole si na jednoduchém příkladě předvedeme základní postup při tvorbě numerické simulace proudění bez databázové podpory programu Workbench. Celý postup si budeme ilustrovat na stejné 2D úloze, která byla použita již v předchozí kapitole. Geometrii a výpočetní síť budeme vytvářet v programu *ICEM CFD*.





D Popis programu ICEM CFD

Program *ICEM CFD* je velice sofistikovaný nástroj na úpravu geometrie a vytváření výpočetní sítě, a to konformní/nekonformní, hybridní/uniformní, strukturované tak i nestrukturované. V programu je možné vytvářet i geometrii, ale kreslení a modelování není asociativní, proto je vytváření složité geometrie velice zdlouhavé. Program také umožňuje implementaci programů pro řešení úloh z oblasti pevnosti a dynamiky pevných těles. Program *ICEM* tak může sloužit jako ekvivalent *Workbench*. To ale není náš případ, protože program *CFX* nelze takto implementovat. Proces síťování je možné specifikovat mnohem podrobněji než v programu *Meshing*. Program je tak vhodný pro pokročilé uživatele a samotný popis se všemi možnostmi programu by vystačil na samostatná skripta a výuku v jednom semestru. My si zde vystačíme s jednoduchým 2D příkladem, na kterém budeme ilustrovat odlišnosti v procesu kreslení a síťování vzhledem k programů implementovaným ve Workbench. Program *ICEM CFD* má shodnou grafickou strukturu s ostatními již popsanými programy. Základní

vzhled programu *ICEM CFD* je zobrazen na Obr. 7.2. Pro přehlednost si v následující tabulce stručně popíšeme základní ikony. Základní ikony vždy poměrně intuitivně graficky znázorňují operaci, které ikona zastupuje.

	Otevření nebo vytvoření projektu
	Uložení projektu
	Otevření geometrie, znovunačtení geometrie
	Otevření sítě, znovunačtení sítě
1	Otevření bloku, (specielní možnost při tvorbě hexa sítě)
Ň	Zotavení pohledu, maximální zoom (zobrazení kdy zoom je nastaven tak aby byly všechny entity na obrazovce viditelné)
Q	Zoom
<u>M</u>	Měření délky úseček
LUS	Souřadný systém, možnosti nastavení
D	Zotavení pohledu
うる	Krok zpět/vpřed
	Možnosti zobrazení drátového modelu/ možnosti zobrazení plného modelu



Obr. 7.2 Grafické rozhraní ICEM CFD

V pravé části se nalézají záložky pro zobrazení specifických ikon daných operací. jednotlivé panely si stručně popíšeme

Geometry	Nástroje pro tvorbu, editaci, modifikaci geometrie
Mesh	Nástroje pro tvorbu sítě, křivkové, plošné objemové
Blocking	Nástroje pro tvorbu bloku, specielní nástroj pro tvorbu hexa sítě. Obdobný
Dioting	Traditoje pro tvorou oroku, specieni nusitoj pro tvorou neku site. Obudon

	princip jako u předchozí úlohy - dělení oblasti na podobjemy a vytvoření sestavy) viz Obr 6.21							
Edit Mesh	Specielní nástroje pro editaci, opravu a kvalitativní vylepšení sítě							
Properties	Nastavení parametrů výpočtu, materiálu atd. (pouze v případě implementace							
	řešiče)							
Constrains	Definice vazeb (ukotvení, vetknutí, posuvná podpora atd.) (pouze v případě							
	implementace řešiče)							
Loads	Definice okrajových podmínek, síla, teplota atd. (pouze v případě							
	implementace řešiče)							
Solve Options	Nastavení řešiče (pouze v případě implementace řešiče)							
Output	Export výpočetní sítě. Možnost exportu pro ca 100 programů							
Cart3D	Parametry reziduálů a monitorování řešení (pouze v případě implementace							
	řešiče).							
Post-processing	Tvorba grafických výstupů a analýza výsledků simulace (pouze v případě							
	implementace řešiče).							

Stejně jako v předchozí kapitole vytvoříme pracovní adresář pro tuto úlohu. V tomto adresáři budou ukládány veškeré soubory (v tomto případě C:\Work/Priklad1_var2). Nastavení provedeme příkazem z textového menu *File→Change Working Dir*... Zde nastavíme vytvořený pracovní adresář viz Obr. 7.3



Obr. 7.3 postup při definici pracovního adresáře

U Vytvoření geometrie v ICEM CFD

Po definici pracovního adresáře projekt uložíme pomocí ikony **b**, soubor pojmenujeme Priklad1. Nyní můžeme začít vytvářet geometrii výpočetní oblasti. Postup při kreslení je poněkud odlišnější a využívá základní geometrické entity a geometrie tak není asociativní. Proces tvorby je řešen po vrstvách. V prvním kroku je nutné vytvořit hraniční body. Tyto hraniční body se následně spojí přímkami, křivkami apod. Pomocí přímek a křivek jsou vytvořeny plochy a následně jsou vytvořeny objemy pomocí ploch.



Obr. 7.4 Postup při vytváření geometrie

Stručný por	ois iedno	tlivých po	ložek v zá	ložce <i>Geom</i>	<i>etr</i> v ie u	iveden v	následující	tabulce.
Strucing pop	ns jeane	, in you po	IOZOK V Zu		c <i>ii y</i> je u		liusicuujiei	uouice.

****	Vytvoření bodů
χ	Vytvoření 1D entity, křivky, přímky, spline atd.
	Vytvoření plochy
	Vytvoření objemu
1 Alexandre	Rozdělení plochy
	Úprava importované geometrie, uzdravení, automatické vyčištění atd.
	Transformace geometrie, posuv, rotace, škálování atd.
<u>2</u>	Obnovení entit
XXXXXXX	Mazání entit

Body vytvoříme prostřednictvím souřadnic X,Y,Z. V záložce *Geometry* zvolíme volbu \checkmark . Po této volbě se v levé dolní části obrazovky upraví panel nástrojů a zobrazuje pouze příkazy platné pro definici bodu. Bod je možné vytvořit celou řadou příkazů, my ale využijeme definici pomocí souřadnic X,Y,Z. Program ICEM CFD nepracuje s jednotkami, ale pouze s číselným formátem. Geometrii tak budeme kreslit v mm. Do tří řádků vepíšeme souřadnice prvního bodu (0,0,0) a volbu potvrdíme *Apply*. V grafickém okně se následně zobrazí bod. Další body vytvoříme obdobně, napíšeme souřadnice a volbu potvrdíme *Apply*. Ostatní body vytvoříme dle následující tabulky a obrázku. Souřadnice bodů jsou určena dle skicy Obr. 7.1.

Tab. 7.1. Tabulka bodů

Bod č.	Х	Y	Z
	[mm]	[mm]	[mm]
1	0	0	0
2	0	200	0
3	-1000	200	0
4	-1000	500	0
5	0	500	0
6	4000	500	0
7	4000	200	0
8	4000	0	0



Obr. 7.5 Označení bodu při jejich tvorbě



Obr. 7.6 Postup při definici bodů

Po ukončení definice posledního bodu a potvrzení Apply uzavřeme panel tlačítkem Dismiss. Nyní máme vytvořeny body, které je možné propojit přímkami. V položce Geometry tedy vybereme tvorbu Křivky je možné definovat celou řadou způsobu. My ale vybereme tvorbu prostřednictvím křivek . Pomocí tohoto nástroje je možné vytvořit křivku libovolným počtem bodů (2 body přímka, bodů 🥇 3 body parabola, atd.). Nyní budeme vždy definovat dva body, které se propojí přímkou. Body vybereme levým tlačítkem myši a volbu potvrdíme prostředním tlačítkem. Pravým tlačítkem je možné



Přímky je vhodné definovat již s ohledem na jejich směr. tento směr pak můžeme využít při tvorbě sítě. Červené šipky na následujícím obrázku naznačují pořadí při výběru bodů při tvorbě přímek. Přímky vytvoříme tak aby byla geometrie tvořena v budoucnu třemi kvádry, aby bylo možné vytvořit kartézskou sít stejně jako v Design Modeleru a Meshing.



Obr. 7.8 Znázornění směru přímky

Po ukončení definice poslední přímky bodu a potvrzení prostředním tlačítkem myši, uzavřeme panel tlačítkem *Dismiss*. Po vytvoření přímek je můžeme sloučit do ploch. V nástroji *Geometry* vybereme

tvorbu ploch **W**. Plochy je možné vytvářet celou řadou nástrojů, např. rotace, vysunutí apod. My ale budeme plochy vytvářet pomocí přímek. Zvolíme tedy možnost **W**. Po této volbě budeme levým tlačítkem vybírat vždy čtyři přímky, které ohraničují plochu. Postup výběru jednotlivých přímek může být již libovolný viz Obr. 7.10. Celkem tedy vytvoříme tři plochy viz. Obr. 7.9

Surfacel	Surface2
	Surface3

Obr. 7.9 Znázornění vytvořených ploch.

Po vytvoření poslední plochy uzavřeme panel tlačítkem *Dismiss*. Jelikož je úloha řešena jako 2D, není nutné vytvářet objemy, prostorovou síť vytvoříme až následně po vytvoření plošné sítě její editací.



Aby bylo možné v *CFX-Pre* definovat okrajové podmínky, je nutné nyní vytvořit tzv. party. Bez tohoto kroku je sice možné vytvořit síť a dokonce ji exportovat, celý povrch by byl však při exportu seskupen do jedné entity. V *CFX-Pre* by se po importu vyskytovala pouze jedna plošná entita, čímž by byl naprosto znemožněn proces definování okrajových podmínek, protože by nebylo možné vybrat danou plochu. Nové party tedy budou reprezentovat jednotlivé okrajové podmínky. Na následujícím obrázku je zobrazeno pojmenování jednotlivých partů.



Obr. 7.11 Vytvoření partu, pojmenování entit

Postup při vytvoření partu je velice jednoduchý. Celý postup si demonstrujeme na vytvoření partů, který bude reprezentovat vstup tekutiny pojmenovaný INLET. Ve stromu v levé části vybereme položku *Part* a pravým tlačítkem vyvoláme kontextové menu a zvolíme položku *Create Part*. Ve vyvolaném panelu pro tvorbu partu vepíšeme jméno *Inlet* do kolonky *Part*. Následně přepneme kurzor myši do vybíracího režimu prostřednictvím ikony a vybereme danou přímku viz Obr. 7.12. pravým tlačítkem a volbu potvrdíme prostředním tlačítkem, anebo tlačítkem *Apply*. Ve stromu by se následně měla pod položkou párt objevit nová entita, která má jinou barvu a její jméno je *INLET* (barva je odlišná pouze z důvodu rozlišení a nemá žádnou jinou vypovídající hodnotu). Následně přepíšeme jméno v položce *Part* na *Outlet*, levým tlačítkem myši vybereme dané přímky a volbu potvrdíme prostředním tlačítkem myši vybereme dané přímky a volbu potvrdíme prostředním tlačítkem myši vybereme dané přímky a volbu potvrdíme prostředním tlačítkem myši vybereme dané přímky a volbu potvrdíme prostředním tlačítkem myši vybereme dané přímky a nemá zádný proces opakujeme i pro ostatní entity. Program ICEM CFD automaticky přepíše veškerá malá písmena v názvu na velká, tato vlastnost je defaultně nastavena a opět nemá žádný vliv na tvorbu. U poslední okrajové podmínky Symmetry_Left nevybereme přímku, ale vybereme tři plochy. Druhá boční okrajová podmínka vznikne až při editaci sítě a není možné ji nvní definovat.

3	5	V 1
Jméno partu	Počet entit	Typ entity
INLET	1	přímka
OUTLET	2	přímka
TOP_WALL	2	přímka
MIDDLE_WALL	1	přímka
BOTTOM_WALL	1	přímka
STEP	1	přímka
SYMMETRY_LEFT	3	plocha

Tab. 7.2. Pojmenování jednotlivých partu



Obr. 7.12 Postup při tvorbě partu, pojmenování entit

Vytvoření sítě v ICEM CFD

Po pojmenování všech podstatných entit je ukončena tvorba geometrie. Nyní můžeme začít definovat parametry výpočetní sítě. Postup je obdobný jako při tvorbě geometrie, nejprve budeme definovat síť na přímkách a následně na plochách. V horním panelu přepneme záložku z položky *Geometry* na položku *Mesh*. V následující tabulce je uveden stručný popis jednotlivých položek a jejich význam.

	Globální nastavení parametrů výpočetní sítě
	Nastavení sítě pro jednotlivé party
	Nastavení sítě pro plochy
A	Nastavení sítě pro křivky
P	Definování parametrů zhuštění sítě

5	Definování konektivních bodů sítě
2	Síťování křivek
	Síťování plochy a objemů

Proces síťování zahájíme definováním globálních parametrů výpočetní sítě. Vybereme ikonu ¹⁰⁰, v otevřeném panelu je možné definovat globální parametry a dále parametry pro povrchovou, objemovou síť, parametry mezní vrstvy a nastavení periodicity výpočetní sítě.

<u></u>	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	Globální nastavení parametrů výpočetní sítě
	Globální nastavení parametrů plošné sítě
	Globální nastavení parametrů objemové sítě
	Globální nastavení parametrů mezní vrstvy
•	Globální nastavení parametrů periodicity sítě

V panelu globálního nastavení je možné nastavit měřítko a maximální velikost elementu sítě. Tyto hodnoty ponecháme ve standardním nastavení a přepneme se do panelu pro definování parametrů

plošné sítě . Zde můžeme nastavit jaký typ výpočetní sítě je preferován pro 2D entity geometrie. Ponecháme výchozí nastavení, protože splňuje naše požadavky.

- Global Mesh Parameters
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
Mesh type Quad Dominant 💌
Mesh method Patch Dependent 💌
Shell Meshing Parameters
Section Patch Dependent
General

Obr. 7.13 Definování typu plošné sítě

Jedná se o výpočetní síť čtyřhrannou (Mesh type $\rightarrow Quad Dominant$). Metoda síťování bude záviset na parametrech sítě u křivek (*Mesh method* \rightarrow *Patch Dependent*). Tuto volbu potvrdíme tlačítkem *Apply*. Ostatní položky není nutné definovat, protože je během procesu síťování nebudeme využívat. Nyní můžeme začít definovat parametry výpočetní sítě pro jednotlivé přímky. Pokud byla geometrie vytvořena podle návodu, je možné nastavit parametry pro několik přímek současně.



Obr. 7.14 Označení přímek při procesu síťování
Síť začneme definovat pro přímky označení číslem 1. Vybereme položku v hlavním panelu. Pomocí tohoto nástroje je možné detailně nastavit parametry sítě pro 1D entity geometrie.



Obr. 7.15 Definování parametrů sítě pro přímky označené číslem 1

V položce *Selected Surface(s)* vybereme tři přímky pomocí ikony \bigotimes , která přepne myš do vybíracího režimu. Přímky vybíráme levým tlačítkem myši. Po výběru třetí přímky potvrdíme volbu prostředním tlačítkem myši. Nyní by se v původně prázdném políčku *Selected Surface(s)* měl objevit text *crv.03*, který označuje vybrané přímky.

Počet elementů na daných přímkách bude identický se sítí, kterou jsme vytvořili v programu *Meshing* (ve *Workbench*). Počet buněk má být 40, do políčka *Number of Nodes* musíme vepsat hodnotu 41 (což je počet uzlů na přímce). Dále ještě chceme zhustit výpočetní síť směrem ke koncům přímek.

Pomocí posuvníku přesuneme okno na položku *Advanced Bunching* (zhušťování sítě). Zhušťování sítě můžeme provést celou řadou metod. V položce *Bunching Law* vybereme metodu *Biexponencial*. Tato metoda umožňuje zhušťovat exponenciálně počet buněk na obou koncích přímky (proto je v názvu předpona bi). V kolonkách *Spacing 1* a *Spacing 2* nastavíme hodnotu 3, což je velikost prvního elementu na koncích přímek. Velikost je bez jednotek, my jsme ale vytvořili geometrii v mm (kreslili jsme v 1000, proto se jedná o mm), takže velikost prvního elementu je 3 mm. V ostatních kolonkách ponecháme 0, což znamená, že tato volba je neaktivní. Tímto jsou nastaveny všechny parametry a můžeme potvrdit tlačítkem *Apply*. Postup je zobrazen na Obr. 7.15. Stejným postupem budeme definovat také ostatní přímky podle následující tabulky. Pozor: před započetím definice sítě u další skupiny přímek je nutné v prvním kroku přepsat registr, tj. vybrat text v políčku *Selected Surface(s)* a

smazat ho tlačítkem *Del*, teprve potom je možné se přepnout do vybíracího režimu tlačítkem a vybrat novou skupinu přímek.

Přímky	Počet bodů	Metoda	Velikost 1	Poměr 1	Velikost 2	Poměr 1	Max.
-	Number of	Bunching Law	Spacing 1	Ratio 1	Spacing 2	Ratio 2	velikost
	nodes						Max.
							Space
1	41	Biexponential	3	0	3	0	0
2	21	Biexponential	3	0	3	0	0
3	51	Geometry 1	3	0	0	0	0
4	201	Geometry 1	3	0	0	0	0

Tab. 7.3. Parametry sítě pro jednotlivé skupiny přímek

Počet bodů *Curve Element Count* a uzlové body sítě *Curve Node Spacing* na 1D elementech je možné zobrazit pomocí následujícího postupu, toto zobrazení funguje pouze jako zpětná vazba pro uživatele, tak aby viděl výsledek operace.



Obr. 7.16 Zobrazení uzlových bodů sítě na 1D entitách.

Ve stromu vybereme položku *Geometry* a vybereme levým tlačítkem položku *Curves*. Následně vyvoláme pravým tlačítkem myši kontextové menu a zvolíme *Curve Node Spacing*. Tím zobrazíme uzlové body. Počet bodů na 1D elementu je možné zobrazit stejným postupem, pouze se v posledním kroku zvolí položka *Curve Element Count*. Výše popsaným postupem se zobrazení zapne natrvalo, a není nutné tento příkaz aktivovat pokaždé, když je na přímce vytvořena síť.



Obr. 7.17 Zobrazení parametrů sítě na 1D elementu

Po definování parametrů u jednotlivých skupin přímek je možné vygenerovat plošnou síť. V panelu *Meshing* vybereme nástroj *Compute Mesh*. V panelu *Compute Mesh* zvolíme možnost *Surface Mesh*, protože vytváříme plošnou síť. Následně bude spuštěn proces vytváření sítě, který je signalizován prostřednictvím process bar ukazatele v pravé spodní části obrazovky. Po ukončení operace je automaticky zobrazena vytvořená síť viz Obr. 7.18. Stejným postupem je možné vytváření sítě, protože samotnou úlohu řešíme jako 2D.



Obr. 7.18 Proces vytváření plošné sítě.

Pokud bychom používali program *Fluent*, mohli bychom rovnou přistoupit k exportu výpočetní sítě. Program *Ansys CFX* však neumí pracovat s čistě dvourozměrnou sítí, proto musíme z 2D sítě vytvořit minimálně jednu vrstvu 3D elementů, tedy pseudo 3D sít². Tuto 3D sít² můžeme vytvořit pomocí nástroje *Extrude Mesh*, která je podobná metodě *Sweep* v programu *Meshing*. V hlavním panelu přepneme z položky *Mesh* do položky *Edit Mesh*. Tím jsou aktivovány nástroje pro úpravu sítě. Zde je možné upravovat a modifikovat vytvořenou sít² a to jak dvourozměrnou, tak trojrozměrnou.

-	Vytvoření elementů
	Vysunutí 2D sítě
Ø	Kontrola sítě
(#	Kvalita sítě
	Upravení, zlepšení kvality a vyhlazení 2D sítě
Į,	Upravení, zlepšení kvality a vyhlazení 3D sítě
	Opravení sítě
4	Slučování uzlových bodů sítě
	Rozdělení sítě
₽ ³	Posun uzlových bodů sítě
	Transformace sítě např. posuv, rotace, měřítko, zrcadlení atd.
*	Asociování sítě, update parametrů
₽ ∎	Konvertování sítě, přeměna typů elementů např. čtverce na trojúhelníky, šestistěny na čtyřstěny apod.
STATES OF THE ST	Zjemnění sítě, upravení hustoty sítě.
N⇔	Přečíslování sítě
t	Nastavení tloušťky sítě
15	Změna orientace normály sítě
X	Smazání uzlových bodů
X	Smazání sítě

Při vytvoření využijeme nástroj vysunutí 2D sítě. V otevřeném okně nejprve vybereme elementy, které chceme vysunout pomocí nástroje pro výběr S. Jelikož chceme vybrat všechny elementy, je

možné v panelu, který se zobrazí v horní části grafického okna, použít nástroj Select All tohoto nástroje jsou vybrány všechny existující elementy. Jelikož při vysouvání vzniknou boční stěny a podstava a objemová entita, je nutné specifikovat jejich jména. V položce New Volume Part Name budeme definovat jméno vzniklého objemu. Objem pojmenujeme Fluid. Položku New Side Part Name ponecháme volbu inherited. To znamená, že jméno bočních stěn bude identické se jménem dané přímky/křivky, která je vysouvána. Poslední položka New top part name slouží pro pojmenování nově vzniklé podstavy při vysouvání. Tato nově vzniklá ploch bude reprezentovat druhou symetrii výpočetní oblasti, proto ji pojmenujeme Symmetry_Right (Symmetry_Left je jméno vytvořené plochy). Dále budeme definovat počet vrstev při vysouvání, jelikož budeme úlohu řešit jako 2D stačí pouze jedna vrstva elementů, ponecháme tedy volbu Number of Layers na hodnotě 1. Dále musíme definovat, jakou metodou bude vysunutí provedeno. Na výběr je několik možností. My zvolíme metodu vysunutí definované vektorem. V položce Method zvolíme typ Extrude by Vector. Následně se program dotáže na vektor, který bude definovat směr vysunutí. Do políčka Vector vepíšeme hodnoty 0 0 1, což jsou souřadnice jednotkového vektoru. Vysouvání tak bude probíhat ve směru +Z. Poslední položkou je políčko Spacing. Zde vepíšeme hodnotu 10, což je tloušťka vrstvy buněk. Tím je kompletně definováno vytvoření 3D sítě vysunutím 2D elementů podle směru daného vektorem. Nastavení tak potvrdíme Apply a poté okno můžeme vypnout příkazem Dissmis.



Po vytvoření sítě se ve stromu objeví v položce *Mesh* nová položka *Volume*, což signalizuje, že byla vytvořena objemová síť. A také v položce *Parts* se objeví nové entity, které byly vytvořeny při procesu síťování viz Obr. 7.20.



Obr. 7.20 Nové entity po vytvoření objemové sítě

Vytvořenou sít si můžeme pro lepší orientaci a lepší vizualizaci zobrazit v takzvaném vyplněném zobrazení. Ve stromu v položce *Mesh* na položce *Shells* vyvoláme kontextové menu pravým tlačítkem a zvolíme volbu *Solid & Wire*. Původní zobrazení je možné kdykoli změnit identickým postupem, ale místo *Solid & Wire* zvolíme *Wireframe* viz Obr. 7.21



Obr. 7.21 Změna zobrazení sítě

Export vytvořené sítě

Posledním krokem je export vytvořené sítě do souboru, který je čitelný v programu *Ansys CFX*. Přepneme se tedy ze záložky *Edit Mesh* na záložku *Output*.

	Výběr solveru, tedy programu, ve kterém se bude úloha řešit. Na výběr je celá řada programů. Program ICEM CFD je v tomto směru univerzální.
H	Přednastavení okrajových podmínek, závisí na volbě solveru.
P	Přednastavení podmínek řešení, závisí na volbě solveru.
	Export sítě do souboru.

Po přepnutí do záložky *Output* vybereme první položku *Select Solver* . Zde v položce *Output Solver* zvolíme program *ANYS CFX*, protože ten používáme pro řešení CFD úloh. Současně s tím se také změní typ souboru se sítí, který bude exportován. Ostatní položky ponecháme, volbu potvrdíme tlačítkem *Apply* a okno zavřeme tlačítkem *Dismiss*. Ostatní nastavení, tj. okrajových

podmínek a přednastavení řešení není pro program CFX možné. Nyní můžeme soubor

vyexportovat 💵 . Po stisknutí tohoto tlačítka se otevře okno pro uložení souboru se sítí. Síť pro program CFX je z programu importována v souboru s příponou *.cfx5. V okně je již přednastaven název podle názvu projektu, tedy Priklad1.cfx5. Jméno tedy nebudeme měnit a soubor uložíme tlačítkem Uložit (Save). Během exportování je ještě programem vyvolána výzva k uložení souboru, tím je zajištěno, že bude exportována aktuální síť a ne síť ze souboru, který byl naposled manuálně uložen. Po potvrzení této volby (volba je doporučena) je zobrazeno okno s parametry exportu. Zde je uvedeno jméno souboru, cesta kde bude soubor exportován a ostatní parametry zápisu. Vše ponecháme a stiskneme tlačítko Done. Tím je proces exportu ukončen. Za povšimnutí stojí položka Scaling. Tato položka umožňuje při exportu zvětšit či zmenšit síť podle nastaveného měřítka, které může být definováno ve všech třech směrech. My tuto položku ponecháme, takže síť bude exportována s rozměry v řádu tisíců (kreslili jsme v mm). V programu CFX pak při importu sítě nastavíme rozměrové jednotky importované sítě na mm, čímž bude síť násobena ve všech směrech hodnotou 0.001. Pokud bychom vybrali při exportu Scaling a definovali Scaling Factor ve všech třech směrech, byla by síť již roznásobená během exportu. V programu CFX bychom pak definovali jednotky importované sítě jako m. Exportem je kompletně ukončena tvorba sítě, projekt tak můžeme uložit *File* → *Save Project* a program ukončíme *Save* → *Exit*.



Obr. 7.22 Postup při exportu sítě

ANIMACE

Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var2\ soubor Priklad1_var2_Video1.exe

7.2 PŘÍPRAVA SIMULACE V PROGRAMU CFX



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- manuálně spustit CFX Launcher.
- manuálně spustit program CFX-Pre a načíst výpočetní síť.
- manuálně zapsat definiční soubor a vyřešit simulaci v CFX-Solver.
- manuálně načíst výsledky simulace a analyzovat je v CFD-Post.



VÝKLAD

D Program CFX-Launcher

Jak již bylo řečeno, program *CFX* se skládá ze tří základních komponent. V manuálním režimu se jednotlivé komponenty spouštějí přes *CFX-Launcher*. *CFX- Launcher* je základní panel pro spuštění jednotlivých komponent programu *CFX* a dále definování pracovního adresáře. Spuštění CFX

Launcher pod Windows se provádí dvojklikem na ikonu 💋.

Pokud je *Launcher* spuštěn správně, objeví se na pracovní ploše okno zobrazené na následujícím Obr. 7.23.



Obr. 7.23 Základní rozhraní programu CFX Launcher

Pomocí Launcheru je tedy možné spustit základní programy

CFX-Pre prostřednictvím ikony ^{CFX-Pre 12.0}, *CFX-Solver* prostřednictvím ikony ^{CFX-Solver Manager 12.0},

CFD Post prostřednictvím ikony CFD-Post 12.0 . Podrobný popis jednotlivých komponent je uveden

v odstavci 6.4. Dále je možné prostřednictvím *Launcheru* spustit program TurboGrid ^{TurboGrid} 12.0</sup> což je úzce specializovaný program pro tvorbu výpočetní sítě u lopatkových strojů (turbíny, odstředivá čerpadla apod.).

□ Manuální načtení výpočetní sítě, definice výpočetní oblasti a okrajových podmínek

Po spuštění *CFX-Launcheru* si nastavíme cestu do pracovního adresáře, který bude identický s pracovním adresářem, v němž je vytvořena síť exportována z programu *ICEM CFD*. Pracovní adresář tedy nastavíme na *D:/Work/Priklad1_Var2*. Nyní může spustit *CFX Pre* a začít definovat simulaci. Po spuštění *CFX-Pre* vytvoříme novou simulaci prostřednictvím ikony . Následně se objeví okno, které slouží pro definování typu úlohy, viz Obr. 7.24. Na výběr máme čtyři možnosti.



GENERAL – spuštění standardního grafického rozhraní pro manuální definici úlohy.

TURBOMACHINERY – spuštění upraveného grafického rozhraní vhodného pro definici výpočtů v rotačních strojích.

QUICK SETUP – spuštění jednoduchého grafického rozhraní vhodného pro laickou definici úlohy. Nevyžaduje hluboké odborné znalosti z proudění a teorie turbulence.

LIBRARY TEMPLATE – využití souboru *.ccl pro automatické definování úlohy. U plně definované úlohy je možné zapsat soubor *.ccl a ten pak použít pro automatické definování obdobné úlohy na jiné výpočetní síti.

Obr. 7.24 Okno pro definici nové simulace

Příklad řešený v této kapitole budeme definovat manuálně, proto spustíme standardní grafické rozhraní *CFX-Pre* volbou *General.* Po potvrzení této volby se pravděpodobně objeví okno s informací, že je zapnut režim automatického vytváření výpočtové oblasti. Tuto informaci akceptujeme tlačítkem *OK* (pokud správce tuto volbu vypnul, tato informace se nezobrazí). Prvním krokem při tvorbě simulace je načtení výpočetní sítě. Síť načteme pomocí ikony no zobrazení okna pro výběr sítě je automaticky nastavena cesta do adresáře *D:/Work/Priklad1_Var2*, protože jsme jej nastavili v *CFX-Launcher.* V položce *File of Type* nastavíme formát souboru sítě, v položce nastavíme program *ICEM CFD* (**cfx* **cfx5*). Jak jsme si řekli v předchozí kapitole, je síť vytvořená v programu *ICEM CFD* bez jednotek. Síť jsme vytvořili v řádech tisíců, takže v mm. Proto musíme také při importu nastavit jednotky, ve kterých byla síť vytvořena. V položce *Option Mesh Units* nastavíme mm, vybereme soubor Priklad1.cfx5 a otevřeme síť tlačítkem *Open*, viz Obr. 7.25.



Po načtení sítě je automaticky vytvořena výpočtová oblast 🗹 🗇 Default Domain . Ve stromu simulace je zobrazen soubor s výpočetní síti.



Od toho kroku je postup při nastavení simulace naprosto identický jako v prostředí *Workbench*, proto nebudeme tyto kroky dále znovu popisovat. Postup si můžeme zopakovat v předchozí kapitole od Obr. 6.35. Po kompletním nastavení simulace od Obr. 6.45 je již postup odlišný.

Manuální zapsání definičního souboru

Nyní budeme definovat definiční soubor, který slouží jako vstupní data pro *CFX-Solver*, který je v prostředí *Workbench* zapsán v *CFX-Pre* a načten v *CFX-Solver* automaticky. V manuálním režimu je nutné definiční soubor nastavit ručně. V manuálním režimu programu *CFX-Pre* je k dispozici další panel s nástroji pro definici úlohy. Význam těchto nových ikon si nyní vysvětlíme.

80	Zapsání definičního souboru a spuštění CFX-Solver s grafickým rozhraním.
1	Spuštění CFX-Solver na pozadí bez grafického rozhraní.
8	Spuštění <i>CFX-Solver</i> s grafickým rozhraním.
	Zapsání definičního souboru.

Definiční soubor zapíšeme pomocí první možnosti. Pomocí ikony Spustíme panel nástrojů pro definici řešení úlohy. V tomto okně je již automaticky nastaven název souboru *Priklad1.def* a cesta, kde má být soubor uložen (dle *CFX-Launcher*). V tomto okně je možné také nastavit běh programu *CFX-Pre* po zapsání definičního souboru. Pokud zaškrtneme volbu *Quit CFX-Pre*, bude po zapsání program ukončen, čímž se částečně vyprázdní operační paměť. Před ukončením programu se většinou ještě zobrazí výzva, zda se má simulace v programu *CFX-Pre* uložit. Pokud tuto volbu nezaškrtneme, zůstane program spuštěný. Položku tedy zaškrtneme a uložíme definiční soubor tlačítkem *Save*. Následně je definiční soubor zapsán, jelikož nebyla před uložením definičního souboru uložena simulace, je před ukončením *CFX-Pre* zobrazeno okno s dotazem, zdali se má simulace uložit. Tuto volbu potvrdíme. Postup je zobrazen na Obr. 7.27. Poté je *CFX-Pre* ukončen a automaticky spuštěn *CFX-Solver*. Po spuštění *CFX-Solver* je zobrazeno okno, ve kterém je již nastavena cesta k definičnímu souboru. Všechny položky je možné ponechat ve výchozím nastavení. Řešení spustíme tlačítkem *Start Run*.



Obr. 7.27 Postup při manuálním uložení definičního souboru

Define Run	
Solver Input File :\Work\Priklad1_var2\Priklad1.def	Sever Sparifie (1904) Malac, arzybietz of Carlos State
Global Run Settings	Type of law field the second s
Run Definition Partitioner Solver Interpolator	Availed Environment D turi Nobi Sensi •
□ Initial Values Specification	Hat two Krittoovinc
Type of Run Full	
Double Precision	Arither Wegdring rode and lo Adamsk.
Parallel Environment	flur bristymet Wolng Strettyy Clyttel Prixell, yw3
Run Mode Serial 🗸	Vi Des-Admini General
Host Name	and a second
NOLDOUKYC	
	Jméno definičního souboru
	<i>Priklad1.def.</i> Nastaveno automaticky
	Typ řešiče
Partition Weighting mode is set to Automatic.	Serial – 1 procesor
Run Environment	Parallel – více procesorů
Working Directory	······································
	Pracovní adresář
Show Advanced Controls	
	Spuštění řešení
Star Run Cance	
Obr. 7.28 Spušte	ění řešení úlohy v <i>CFX-Solver</i>
	100



Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var2\ soubor Priklad1_var2_Video2.exe

Vyřešení úlohy

Postup při řešení je zcela identický s postupem v prostředí *Workbench* a tedy velice jednoduchý, po spuštění řešení tlačítkem Start Run viz Obr. 7.28. Nyní je třeba vyčkat na vyřešení úlohy, a tedy zkonvergování. Po dosažení nastavené přesnosti je *Solver* zastaven a posléze je zapsán soubor s výsledky. Tato informace je zobrazena v okně, které se po ukončení automaticky otevře. V tomto okně je možné nastavit dvě možnosti ukončení. Tyto možnosti nejsou dostupné při simulaci v prostředí *Workbench* viz Obr. 6.52. Při manuálním řešení jsou tedy navíc v okně o potvrzení vyřešení dostupné tyto volby.

Post-Process Results – po zaškrtnutí této možnosti je po potvrzení řešení tlačítkem *OK* automaticky spuštěn *CFD-Post* a načten soubor s výsledky.

Shut down CFX-Solver Manager – po zaškrtnutí této volby je automaticky ukončen *CFX-Solver*. Čímž je možné částečně uvolnit operační paměť.



Obr. 7.29 Potvrzení ukončení řešení v manuálním řešení

Jelikož již nebudeme potřebovat *CFX-Solver*, je možné jej ukončit, a také můžeme ihned začít analyzovat výsledky, proto zaškrtneme obě položky a potvrdíme ukončení řešení tlačítkem OK.



Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var2\ soubor Priklad1_var2_Video3.exe

□ Analýza výsledků

Postup při analýze výsledků je zcela totožný jako v prostředí *Workbench*. Po automatickém spuštění *CFD-Post* a načtení výsledků provedeme analýzu výsledků, jak je uvedeno v kapitole 6.6.

Po provedení analýzy výsledků CFD simulace uložíme vyhodnocovací soubor pomocí ikony ¹/₁. Jméno souboru je přednastaveno na *Priklad1.cst*.



Animaci si může student zobrazit

- odkazem ANIMACE
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var2\ soubor Priklad1_var2_Video4.exe

Výsledky je možné kdykoli znovu zobrazit. Stačí pouze spustit CFD-Post a pomocí ikony anačíst soubor *Priklad1.cst*. Následně se automaticky načte soubor s řešením *Priklad1.res*, a zobrazí se všechny entity ve vyhodnocení, které jsme vytvořili a uložili do souboru *.cst.



Animaci si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var2\ soubor Priklad1_var2_Video5.exe

7.3 VYTVOŘENÍ CFD SIMULACE V PROSTŘEDÍ WORKBENCH S EXTERNÍ SÍTÍ



Čas ke studiu: 0.2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• vytvořit simulaci v prostředí Workbench s externí sítí.



VÝKLAD

V předchozích kapitolách jsme si ukázali, jak je možné vytvořit CFD simulaci v prostředí *Workbench* a manuálně, tj. geometrii a síť jsme vytvořili v programu *ICEM*. Nyní si ukážeme poslední možnost. V programu *Workbench* vytvoříme projekt, který bude obsahovat pouze program *CFX*. Nebude tedy obsahovat položku *Design Modeler* a *Meshing*. Spustíme program *Workbench*, a uložíme prázdný projekt se jménem *Priklad1.wbdb*. Pokud bychom chtěli vytvořit celou simulaci, ze záložky *Analysis Systems* bychom zkopírovali do pracovního prostoru modul S Fluid Flow (CFX). To ale nechceme, protože tento modul obsahuje také položku geometrie a sítě. Proto tedy zvolíme jiný postup. Minimalizujeme záložku *Analysis Systems* a rozvineme záložku *Component Systems*. Tato záložka obsahuje nikoli seskupené projekty, ale jednotlivé komponenty simulací. Pokud tedy vybereme položku S a přesuneme ji do pracovního prostoru, vytvoří se projekt, který obsahuje tří položky zastupující *CFX-Pre* Setup, *CFX-Solver* Soluton a *CFD-Post* Priklad1.cfx5 prostřednictvím ikony a další postup je identický s definicí simulace v prostředí *Workbench*. Proces definice položek je možné si zopakovat od kap 6.4.



Obr. 7.30 Potvrzení ukončení řešení v manuálním řešení



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

• odkazem <u>ANIMACE</u>

 spustit ručně z adresáře Animace\Priklad1_var2\ soubor Priklad1_Video2-4fullproces.exe

SHRNUTÍ POJMŮ Č. 7

Part je pojmenovaná položka v programu *ICEM CFD*. **Bunching** je metoda zhušťování sítě na 1D entitách v programu *ICEM CFD*. **CFX-Launcher** je program pro spouštění jednotlivých komponent *CFX*.



OTÁZKY Č. 7

- 1. Jaký je postup při vytváření geometrie v programu ICEM CFD?
- 2. Vyjmenujte základní rozdíly při tvorbě geometrie v programu ICEM CFD oproti Design Modeler?
- 3. Jaký je postup při vytváření výpočetní sítě v programu ICEM CFD?
- 4. Vyjmenujte základní rozdíly při tvorbě sítě v programu ICEM CFD oproti Meshing?
- 5. Jaké jsou základní rozdíly mezi simulací v prostředí Workbench a manuálním režimem?

8 PŘIROZENÁ KONVEKCE V MEZEŘE S NÁHLÝM ROZŠÍŘENÍM

8.1 MODIFIKACE PROJEKTU CFD SIMULACE



Čas ke studiu: 0.25 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- modifikovat projekt.
- editovat geometrii a využít asociativní kótování.
- modifikovat parametry sítě.



Popis úlohy

V této kapitole provedeme jednoduchou simulaci přirozené konvekce. V tomto případě bude vyvoláno proudění pouze rozdílem teplot na stěnách. V důsledku změny hustoty vzduchu v závislosti na teplotě vyvolají vztlakové členy v řešené oblasti vířivé proudění (teplý vzduch bude stoupat vzhůru, studený klesat dolů). Do oblasti tedy nebude tekutina vstupovat a proudění bude vyvoláno pouze teplotním gradientem.



Obr. 8.1 Schematický náčrt řešené oblasti s definicí problému

Rozměry oblasti a okrajové podmínky

Jere J	
Délka oblasti	L = 0.5 m
Výška oblasti	d = 0.05 m
Výška schodu	$d_s = 0.02 \text{ m}$
Délka schodu	$L_{s} = 0.1 \mathrm{m}$
Teplota studené stěny	$t_I = 5^{\circ} \mathrm{C}$
Teplota teplé stěny	$t_2 = 45^{\circ} \text{C}$
Tíhové zrychlení (osa z)	$g = -9.81 \text{ m/s}^2$
Proudící tekutina	Vzduch

U přirozené konvekce nerozhoduje o režimu proudění **Reynoldsovo** číslo, ale číslo **Rayleighovo**, které je definováno vztahem

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T D^3 \rho^2 c_p}{\eta \lambda}$$

kde g je tíhové zrychlení, β je koeficient teplotní roztažnosti tekutiny, ΔT je teplotní gradient, D je charakteristický rozměr oblasti, ρ je průměrná hustota proudící tekutiny, c_p je měrná tepelná kapacita tekutiny, η je dynamická viskozita a λ je tepelná vodivost tekutiny.

Průměrná teplota vzduchu v oblasti je $\frac{45+5}{2} = 25$ °C, proto použijeme pro výpočet vlastnosti

vzduchu při teplotě právě 25°C

Ra = 485820

Dle následujících podmínek je možné tedy z hodnoty **Rayleighova** čísla určit, zda se jedná o proudění laminární nebo turbulentní.

 $Ra < 10^8 \rightarrow laminární proudění$ $10^8 < Ra < 10^{10} \rightarrow přechod od laminárního k turbulentnímu proudění$ $Ra>10^{10} \rightarrow turbulentní proudění.$ Proudění je tedy v řešené oblasti laminární

U Vytvoření simulace

V předchozí kapitole jsme se naučili vytvořit CFD projekt s využitím programu *Workbench*. Naše další úloha se bude zabývat přirozenou konvekcí v oblasti, která je stejná jako u úlohy č.1, ale je 10x menší. Z toho vyplývá, že můžeme využít předchozí projekt a upravit jeho základní parametry. Nejprve si vytvoříme nový pracovní adresář *C:/Work/Priklad2* (nebo jiný podle uvážení uživatele). Spustíme program Workbench a pomocí ikony ikony otevřeme projekt *Priklad1.wbdb*. Následně ho pomocí ikony uložíme jako *Priklad2.wbdb* do nově vytvořeného adresáře *C:/Work/Priklad2*. Tím jsme vytvořili kopii, kterou je možné editovat, aniž by byl změněn původní projekt. Před tím, než začneme editovat jednotlivé položky projektu, můžeme vynulovat "resetovat" nastavení položek, které přísluší programu CFX. U položek setup , solution , a Results vyvoláme po výběru dané položky pravým tlačítkem myši kontextové menu a zvolíme Reset. Při postupu resetu postupujeme směrem od konce, tj. první resetovanou položkou bude setup a poslední setup.

Přirozená konvence v mezeře s náhlým rozšířením



Obr. 8.2 Postup resetování projektu



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

- odkazem ANIMACE
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video1.exe

□ Modifikace geometrie

V této kapitole využijeme výhody asociativního kotování, které je součástí *Design Modeleru*. Spustíme program *Design Modeler* dvojklikem na položku Geometry Geometry v projektu. Po spuštění programu můžeme začít editovat jednotlivé položkytak, abychom je upravili dle zadání. Po načtení geometrie vybereme položku CE Extrudel Kliknutím na symbol E zobrazíme položku CS Sketchl. Pokud vybereme tuto položku, zobrazí se v levé dolní části vlastností dané skicy, tj. rozměry kót. Ze zadání je zřejmé, že všechny rozměry jsou 10x menší. Upravíme všechny rozměry tak, že editujeme hodnotu odstraněním jedné 0. Po změně kót se u některých položek objeví symbol blesku např. právě u položky CE Extrudel, což znamená, že daná položka není aktuální, anebo že byly změněny parametry. Nyní klikneme na tlačítko Cenerate, tím potvrdíme volbu a modifikace se vykonají. Následně se v grafickém okně 10x zmenší geometrie, což jsme chtěli.

~ 🖸	Extrude1		🞸 💽 Extrude1				
H1	5000 mm	H1	500 mm				
H2	1000 mm	H2	100 mm				
V3	500 mm	□ V3	50 mm				
V4	300 mm	V4	30 mm				
Generate € Extrude1							

Obr. 8.3 Editace rozměrů oblasti

Další položku, kterou bychom měli změnit, je tloušťka 2D oblasti. Tloušťka byla nastavena u původní geometrie na 10mm, to je ale nyní zbytečně moc, takže můžeme i tuto hodnotu 10x zmenšit. Vybereme položku v Extrudel, nyní v okně vlastností příkazu modifikujeme FD1 Depth (>0)

z původních 10 mm na 1 mm. Tím se opět označí některé položky žlutým bleskem, takže nejsou aktuální. Tlačítkem ³ Generate</sup> aktualizujeme příkaz vysunutí.

	, 💽 E	xtrude1		🥜 💽 Б	drude1
-	Details of Extrude1		Ξ	Details of Extrude1	
	Extrude	Extrude1	-	Extrude	Extrude1
	Base Object	Sketch1		Base Object	Sketch1
	Operation	Add Material	F F	Operation	Add Material
	Direction Vector	None (Normal)		Direction Vector	None (Normal)
	Direction	Normal		Direction	Normal
	Direction	Norman	-	Extent Type	Fixed
	Extent Type	Fixed	_	FD1, Depth (>0)	1 mm
	FD1, Depth (>0)	10 mm		As Thin/Surface?	No
	As Thin/Surface?	No		Merge Topology?	Yes
	Merge Topology?	Yes			
			ジ Generate	У 🖪 Б	drude1

Obr. 8.4 Editace operace vysunutí

Tím je úprava geometrie ukončena, takže geometrii uložíme \blacksquare a program ukončíme *File* \rightarrow *Close Design Modeler*.



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video2.exe

D Modifikace výpočetní sítě

Po modifikování geometrie můžeme přistoupit k modifikaci sítě. Program *Meshing* spustíme dvojklikem na položku ^{Mesh}. Následně se zobrazí informace o tom, že je k dispozici aktualizovaná geometrie. Uživateli je tedy kladena otázka, zdali se má načíst aktualizovaná geometrie viz Obr. 8.5. Tuto výzvu tedy kladně potvrdíme. Následně se spustí program *Meshing* a začne se aktualizovat geometrie oblasti.



Obr. 8.5 Potvrzení aktualizace geometrie

Parametry síťování jsou vázaný na geometrické entity, jako přímky, plochy a objemy. Po aktualizaci by tedy postačilo pouze vygenerovat novou síť tlačítkem Update. Na teplé a studené stěně bude při výpočtu poměrně velký gradient teploty, proto je žádoucí v těchto místech zhustit síť. Výpočtovou síť tedy zahustíme směrem k přímce 1,4+2 a 3+5



Obr. 8.6 Označení přímek při procesu síťování

Tab. 8.1 Upraveni parametru sitovani u modifikovanych primek							
Označení v	Přímky	Počet elementů	Nastavení	Zjemnění	Velikost		
Meshing	č.	Number of Divisions	Behavior	Bias Type	Bias Factor		
Edge Sizing 3	6	200	Hard		10		
Edge Sizing 4	7,8	200	Hard		10		
Edge Sizing 5	9	50	Hard		10		
Edge Sizing 6	10	50	Hard		10		

Tímto nastavením bude síť nahuštěna ke všem stěnám. Výpočetní síť vygenerujeme pomocí tlačítka $\frac{1}{2}$ Update . Výpočetní síť je aktualizována a vygenerována, program *Meshing* tedy můžeme ukončit příkazem *File* \rightarrow *Close Meshing*. Následně ještě uložíme celý projekt ve *Workbench* příkazem



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

• odkazem <u>ANIMACE</u>

0 1 11

.

• spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video3.exe

8.2 DEFINICE CFD SIMULACE PŘIROZENÉ KONVEKCE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



- Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět
 - určit režim proudění při přirozené konvekci.
 - upravit parametry a rozměry geometrie existující simulace.
 - definovat CFD úlohu se vztlakovými členy.



VÝKLAD

Definice výpočtové oblasti

V případě, že se jedná pouze o proudění vyvolané malou změnou teploty a nedochází k výrazné změně tlaku v oblasti, není nutné u vztlakových sil řešit stlačitelnost plynu pomocí stavové rovnice, ale lze

v těchto případech využít **Boussinesqovu aproximaci**. Ta řeší hustotu pouze na základě teploty a objemové roztažnosti plynu

 $\rho = \rho_{ref} \left(1 - \beta \left(T - T_{ref} \right) \right).$

kde ρ_{ref} je referenční hustota, β je objemová roztažnost, T je teplota a T_{ref} je referenční teplota. Nastavení výpočetní oblasti provedeme dle Obr. 8.7.

V záložce *Basic Settings* zvolíme jako proudící materiál vzduch s konstantní hustotou při 25°C, tj. položku *Air at 25°C* a dále, jelikož chceme řešit vztlakové členy, musíme zvolit položku vztlakové členy *Buoyancy*, definovat vektor tíhového zrychlení $g = (0, -9.81, 0) \text{ m/s}^2$ (jak je zřejmé z Obr. 8.1, tíhové zrychlení jde proti směru osy z) a referenční teplotu *Buoy. Ref. Temp* $T_{ref} = 25$ °C (tu spočítáme jako průměr maximální a minimální teploty v řešené oblasti). Jelikož je referenční teplota 25°C, měla by být také hustota vzduchu jako materiálová vlastnost definována při 25°C, tuto položku není nutné definovat, protože materiál je již definován pro 25°C a hustotu vzduchu, která je v tomto případě referenční, není nutné opravovat.

V záložce *Fluid Models* musíme v položce *Heat Transfer* vybrat možnost *Thermal Energy*, protože řešíme teplotní pole, respektive rovnici energie. Režim prouděni je v našem případě laminární, proto zvolíme v položce Turbulence *None (Laminar)*.

Outline Domain: Fluid	đ		Basic Settings	Fluid Models	Initialisation		
Details of Fluid in Flow A	nalysis 1		-Heat Transfer-				
Basic Settings Fluid	Models Initialisation	1	Option	Therma	l Energy	•	
Morphology			Incl. Viscous	s Dissipation			
Option	Continuous Fluid 👻		Turbulence				
I Minimum Volun	ne Fraction	₽_	Option	None (L	.aminar)	•	
Domain Models			Combustion				Ξ
Pressure			Option	None		•	
Reference Pressure	1 [atm]		-Thermal Radiat	ion			Ξ
Buoyancy		-8-	Option	None			
Option	Buoyant 👻						
Gravity X Dirn.	0 [m s^-2]						
Gravity Y Dirn.	-9.81 [m s^-2]						
Gravity Z Dirn.	0 [m s^-2]						
Buoy. Ref. Temp.	25 C 👻						
Ref. Location							
Option	Automatic 🗸						
Domain Motion							
Option	Stationary 👻						
Mesh Deformation		-8					
Option	None 👻						
<u></u>							

Obr. 8.7 Definování výpočtové oblasti

Definice okrajových podmínek

Nyní podle následující tabulky vytvoříme okrajové podmínky. Vkládaní budeme provádět kliknutím na ikonu **1**. Podrobně je zobrazeno vytváření okrajové podmínky na Obr. 6.38 až Obr. 6.43.

J ·						
Okrajová pod	mínka	Základ	Podrobné nastavení			
Insert Boundary		Basic Settings		Boundary Details		
Jméno Name ²⁾	Oblast Domain ¹⁾	Typ podmínky <i>Boundary Type</i>	Umístění <i>Location</i>	Přestup tepla Heat Transfer		
Symmetry Left	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_LEFT		\ge	
Symmetry Right	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_RIGHT		\ge	
Cold Wall	Fluid	Wall	INLET	Temperature	5°C	
Hot Wall	Fluid	Wall	OUTLET	Temperature	45°C	

Tab. 8.2 Tabulka okrajových podmínek

Poznámka: 1) Pokud nebylo provedeno přejmenování oblasti na *Fluid*, bude zachováno standardní pojmenování *Default Domain*.

2) Jméno (Name) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování.

Automaticky vytvořenou podmínku *Fluid Default* nebudeme modifikovat, protože jde standardně o dokonale izolovanou stěnu (*Adiabatic*), a toto nastavení je v tomto případě požadováno.

□ Inicializace a nastavení řešiče

Úlohu je nutné před výpočtem inicializovat. Inicializaci provedeme kliknutím na ikonu $t_{\pm 0}$. Po té se v pracovním okně zobrazí inicializační panel, viz Obr. 8.8. V našem případě budeme do celé oblasti inicializovat průměrnou teplotu 25°C, čímž řešení urychlíme (je možné ponechat všechny položky *Automatic*). Volbu potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*.

Outline Initialisation		×
etails of Global Initialis	ation in Flow Analysis 1	
Global Settings		
Coord Frame		
Initial Conditions		Ξ
Velocity Type	Cartesian	•
-Cartesian Velocity Co	mponents	
Option	Automatic	•
Velocity Scale		
Static Pressure		
Option	Automatic	•
Temperature		
Option	Automatic with Value	•
Temperature	25 C	-

Obr. 8.8 Zobrazení inicializace

Nyní zbývá ještě definovat nastavení řešiče. Definování provedeme kliknutím na ikonu . Následně se v pracovním okně zobrazí základní okno se standardním nastavením, viz Obr. 6.45. U tohoto jednoduchého příkladu budeme měnit pouze počet iterací na 1000. Do výpočtu také zahrneme dodatečnou kontrolu zákonů zachování. Zaškrtneme položku *Conservation Target* a nastavíme hodnotu 0.001. Tato hodnota znamená, že nerovnováha zákonu zachování musí být menší než 0.1% Při řešení se budou kontrolovány dva parametry, a to jak přesnost, tak i dodržení zákonu zachování. Úloha bude nyní řešena tak dlouho, až budou splněny oba parametry, anebo dosaženo 1000 iterací.

Nastavení potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Úlohu uložíme \blacksquare , a program ukončíme *File* \rightarrow *Quit*. V dalším kroku spustíme řešič a iteračně úlohu vyřešíme.



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video4.exe

□ Řešení úlohy

V programu *Workbench* nyní vyřešíme úlohu. Klikneme na ikonu ⁷ Update Project</sup>. Tím bude zahájen automaticky proces řešení a po vyřešení bude načten soubor s výsledky do modulu *CFD-Post*.



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video5.exe

8.2. ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ CFD SIMULACE PŘIROZENÉ KONVEKCE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• analyzovat výsledky proudění při přirozené konvekci.



VÝKLAD

D Tvorba vyhodnocovacích rovin a přímek

Program *CFD-Post* spustíme dvojklikem na položku **Program** *CFD-Post* spustíme dvojklikem na položku *Program CFD-Post* spustíme *Program CFD-Post* spustíme dvojklikem na položku *Program CFD-Post* spustíme *Program Program CFD-Post* spustíme *Program Program Progr*

ikony Location . Dle následující tabulky vytvoříme vyhodnocovací rovinu (podrobný návod viz Obr. 6.55) a přímku (podrobný návod viz Obr. 6.63).

				2	1	5	
Imána		Bod 1			Bod 2		Počet
Jineno Marro		Point 1			Point 2		vzorků
Ivame	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Samples
Line 1	0.25	0	0.0005	0.25	0.05	0.0005	100

Tab. 8.3 Tabulka pro	o definici vyhodnoc	ovací přímky
----------------------	---------------------	--------------

Jméno	Metoda	Souřadnice) v
Name	Method	Z	
Plane 1	XY Plane	0.0005	

Tab. 8.4 Tabulka pro definici vyhodnocovací roviny

D Zobrazení kontur rychlosti a teploty

Pokud máme vytvořeny vyhodnocovací entity, můžeme přistoupit k zobrazování výsledků. Nejprve si zobrazíme teplotní a rychlostní pole. Návod pro nastavení je podrobně zobrazen viz Obr. 6.57

Vložení obrázku	Základní nastavení					
Insert Contour	Geometry					
Jméno	Umístění	Veličina	Rozsah	Umístění		
$Name^{1)}$	Location	Variable	Range	Location		
Contour 1	Plane 1	Temperature	Global	Plane 1		
Contour 2	Plane 1	Velocity	Global	Plane 1		
Contour 3	Plane 1	Velocity u	Global	Plane 1		
Contour 4	Plane 1	Velocity v	Global	Plane 1		

Tab. 8.5 Tabulka	pro definici konturovan	ých obrázků
------------------	-------------------------	-------------

Poznámka: 1) Jméno (Name) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování



Obr. 8.9 Zobrazení teplotního pole, rovina 1 (Plane 1)





Obr. 8.11 Zobrazení rychlosti ve směru osy X, rovina 1 (Plane 1)



Obr. 8.12 Zobrazení rychlosti ve směru osy Y, rovina 1 (Plane 1)

D Zobrazení vektorového pole

Vložení vektorů Insert Vector	2	Základní nastaven Geometry	í	Grafické zob Syn	razení vektoru nbol
Jméno Name 1)	Umístění <i>Location</i> 2)	Vzorkování Sampling	Veličina Variable	Velikost symbolu Symbol Size	Normalizovaná velikost Normalize Symbols
Vector 1	Plane 1	Vertex	Velocity	0.1	Ano

Tab. 8.6 Tabulka pro definici vektorového pole

Poznámka: 1) Jméno (*Name*) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování.
2) Pokud byla rovina pojmenována jinak, je jméno umístění jiné.

Použitím normalizovaných symbolů vektorů není velikost vektorů úměrná rychlosti. Rychlost je zobrazena pouze barevným schématem. Pokud by uživatel požadoval zobrazení velikosti vektorů úměrné rychlosti, je nutné vypnout normalizaci vektorů a upravit měřítko velikosti symbolu na cca 0.35.



Obr. 8.13 Detailní zobrazení vektorů rychlosti v oblasti teplé a studené stěny, rovina 1 (*Plane 1*)

D Zobrazení rychlostního a teplotního profilu

Přibližně ve středu výpočetní oblasti je vytvořena vyhodnocovací přímka, na které si pomocí grafu XY vyhodnotíme rychlostní a teplotní profil. Detailní popis vytváření grafu je zobrazen viz Obr. 6.65.

Vložení grafu	Graf		Graf přímka 1		
Insert Chart	Ch	art	Chart Line 1		
Jméno	Název	Typ grafu	Umístění	Osa X	Osa Y
Name	Title	Type	Location	X Axis	Y Axis
1)			2)	Veličina	Veličina
				Variable	Variable
Chart 1	Velocity	XY	Line 1	Y	Velocity v
Chart 2	Temperature	XY	Line 1	Y	Temperature

Tab. 8.7 Tabulka pro definici grafů

Poznámka:

Jméno (*Name*) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování.
 Pokud byla přímka pojmenována jinak, je jméno umístění jiné.



Obr. 8.14 Detailní zobrazení profilu rychlosti ve směru osy Y



Obr. 8.15 Detailní zobrazení profilu teploty ve směru osy Y

Výsledky simulace odpovídají teoretickým předpokladům, vzduch se u teplé stěny ohřívá a stoupá vzhůru, poté postupuje podél horní stěny ke studené stěně, kde se ochladí a klesá směrem dolů podél spodní stěny, pak se dostane ke stěně teplé a celý koloběh se opakuje. Nejvyšší teplota je v pravém horním rohu a naopak nejnižší je v levém dolním rohu. Také z profilu teploty je vidět že teplota se stoupající výškou roste, tj. teplý vzduch je u horní stěny a studený naopak u dolní. Rychlostní profil je symetrický vzhledem k vodorovné ose a je z něj patrné, že vzduch se v dolní části pohybuje k teplé stěně a v horní části naopak ke stěně studené.



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video6.exe

8.3 DALŠÍ VARIANTA



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

|--|

Cíl

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vytvořit další variantu řešení s identickou sítí.
- vytvořit soubor s nastavením CFD simulace ccl.
- použít soubor ccl pro definici úlohy.



VÝKLAD

Definice okrajových podmínek u nové varianty

Celý výpočet zopakujte, tj. proveďte všechna nastavení identicky, rozdíl bude pouze v tabulce okrajových podmínek. Tento příklad bude reprezentovat případ kdy teplá stěna je dole a studená nahoře.

10	rab. 8.8 rabuka okrajovych podninek pro druhou vahantu prikladu					
Okrajová pod	mínka	Základ	Podrobné nastavení			
Insert Bound	dary	Basic Settings		Boundary Details		
Jméno	Oblast	Typ podmínky	Umístění	Přestup ter	pla	
Name	Domain	Pour dam Tune	Logation	Heat Trans	sfer	
2)	1)	Boundary Type Location				
Symmetry Left	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_LEFT		\ge	
Symmetry Right	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_RIGHT		\searrow	
Cold Wall	Fluid	Wall	TOP_WALL_	Temperature	5°C	
Hot Wall	Fluid	Wall	BOTTOM_WALL_	Temperature	45°C	

Tab. 8.8 Tabulka okrajových podmínek pro druhou variantu příkladu

Abychom nemuseli nastavovat veškeré parametry znovu, je možné využít zápis nastavení v nativním příkazovém jazyku. Jedná se o jazyk CCL (*CFX Command Langue*). Dvojklikem na položku setup znovu spustíme *CFX-Pre*. Po načtení úlohy spustíme kliknutím na ikonu doho pro export nastavení. V levé části okna je zobrazen standardní panel pro uložení, tj. jméno souboru, typ souboru a místo uložení. Zvolíme jméno *Schod_Varianta1*, a soubor uložíme do pracovního adresáře pro příklad č.2. *C:/Work/Priklad2*. V pravé části obrazovky je zobrazen kompletní strom simulace. Výběrem položek v tomto stromu můžeme určit, které položky budou v exportovaném souboru. V našem případě chceme uložit celou simulaci, proto zvolíme položku strom. Vím by se měl celý strom zbarvit modře, což znamená, že položky jsou vybrány. Nyní můžeme soubor uložit příkazem *Save*. Postup je zobrazen na Obr. 8.16. Nyní můžeme *CFX-Pre* ukončit.



Obr. 8.16 Operace exportu souboru CCL

U Vytvoření nové variantu výpočtu v projektu

Původní variantu výpočtu již máme kompletně vypracovánu a nyní chceme projekt rozšířit o další variantu. Do projektu přesuneme položku ^O CFX z nástroje *Component Systems*. Tím vložíme do projektu novou položku CFX, která ale nebude obsahovat geometrii ani síť. Pro lepší orientaci si obě simulace přejmenujeme. Původní simulaci přejmenujeme *Schod varianta1*, a novou simulaci přejmenujeme z původního názvu CFX na *Schod varianta2*. Nyní provedeme sdílení sítě mezi oběma variantami. Tyto položky budou totiž u obou simulací identické. Vytvoření sdílení položek je velice jednoduché, v první simulaci vybereme levým tlačítkem myši položku ^O Mesh a při stále stisknutém tlačítku přesuneme tuto položku na položku ^O Setup u druhé simulace. Položka ^O Setup u druhé simulace by se měla v tuto chvíli změnit. V položce se objeví text *Transfer A3*. V tuto chvíli je možné levé tlačítko uvolnit. Následně se v projektu objeví modrá spojnice, která naznačuje vazbu mezi jednotlivými simulacemi.



Obr. 8.17 Vytvoření sdílené sítě mezi dvěma simulacemi.

Definování druhé simulace pomocí souboru CCL

V druhé simulaci je tak již načtena síť a můžeme začít definovat simulaci dvojklikem na položku setup druhé simulace. Po spuštění simulace bude načtena síť a bude vytvořena defaultní okrajová podmínka pro doménu a stěnu. Tuto oblast nyní odstraníme. Levým tlačítkem vybereme položku Default Domain a pravým tlačítkem vyvoláme kontextové menu, ve kterém vybereme X Delete. Tím

odstraníme defaultně vytvořené položky simulace. Nyní spustíme import souboru CCL ikonou Vybereme soubor *Schod_Varianta1.ccl.* z adresáře *C:/Work/Priklad2*. V okně ještě zkontrolujeme nastavení. V pravé části je možné zvolit dvě formy importu Doplnit (*Append*) a Nahradit (*Replace*). V prvním případě jsou do simulace doplněny ze soboru CCL pouze položky, které nejsou prozatím definovány. V druhém případě jsou všechny stávající položky přepsány. Zvolíme druhou položku, v simulaci tak přepíšeme defaultní nastavení řešiče a jiné položky. Import CCL souboru spustíme tlačítkem *Open*. Po importu bude defacto zkopírováno nastavení simulace v první variantě. Dle tabulky Tab. 8.8 upravíme okrajové podmínky. Teplá stěna bude nyní entita pojmenována BOTTOM_WALL a studená stěna bude entita TOP_WALL. Tím je nastavení druhé simulace ukončeno. Soubor uložíme a program *CFX-Pre* ukončíme.



Obr. 8.18 Import souboru CCL



Animaci kompletního procesu definice druhé simulace si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video7.exe

U Vyřešení druhé simulace

Předposledním krokem bude vyřešení druhé simulace. Ve *Workbench* stiskneme tlačítko ^J Update Project</sup>. Spustí se tak řešení simulace a následné zapsání souboru s výsledky.

ANIMACE

Animaci kompletního procesu řešení druhé simulace si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video8.exe

Analýza výsledků simulace

Abychom nemuseli znovu definovat všechny položky jako u první simulace, při analýze v CFD-Post je možné využít soubor *.cst, který má podobnou funkci jako CCL. Tento soubor obsahuje pouze informace o vyhodnocovacích rovinách, barevných obrázcích apod. a není závislý na souboru s výsledky. Vyvstává ale otázka, kde je soubor *.cst z první simulace uložen. Postup je velice jednoduchý. U první simulace vyvoláme kontextové menu a vybereme položku Properties. Následně se v pravé části zobrazí okno se systémovým názvem první simulace. Toto jméno nesouvisí s pojmenováním, které může změnit uživatel. Svstémové jméno je CFX. Dle toho jména je možné nalézt adresář s jednotlivými položkami simulace. V pracovním adresáři C:/Work/Priklad2 je adresář Priklad2_files, což je systémový adresář projektu Workbench. V tomto adresáři jsou všechny položky projektu. Po otevření tohoto adresáře nás bude dále zajímat adresář dp0, tento adresář je pojmenován podle sousloví Design Point. Jelikož nevyužíváme v simulaci optimalizační nástroje, je tento adresář jediný ve, kterém jsou jednotlivé položky simulací. Po otevření adresáře dp0 se zobrazí další dva adresáře pojmenované CFX a CFX-1. Jak již víme adresář CFX náleží první simulaci. V tomto adresáři jsou další podadresáře, které jsou pojmenované podle jednotlivých položek simulace, např. DM –soubor s geometrií, MESH-Soubor se sítí, CFX- soubory programu CFX a konečně Post, což je adresář s výsledkovým souborem první simulace. Dvojklikem na položku 🥯 Results u druhé simulace spustíme program CFX-Post. Po načtení výsledků nebudeme vytvářet roviny, přímky apod., ale otevřeme vyhodnocovací soubor pomocí ikony 🚘. V následně otevřeném okně vybereme adresář C:/Work/Priklad2/Priklad2_files/dp0/CFX/Post, ten by měl obsahovat jediný soubor s příponou *.cst.

Tento soubor vybereme a stiskneme tlačítko *Open*. Následně se spustí proces definice vyhodnocovacích položek, které budou identické jako u první simulace. Tímto krokem jsme do druhé simulace zkopírovali vyhodnocení první simulace. Po prohlédnutí výsledků můžeme program ukončit a celý projekt ve *Workbench* uložit.

6	Load State File	
	Look in: Look vir Kladd2 files (dp0) CFK (Post Cook in: Critical Criticae	State option C Replace current state Add to current state Load results Preserve current results expressions
₩	Ele name:	
	Files of type: [CFD-Post State (*.cst) Cancel	

Obr. 8.19 Otevření výsledkového souboru první simulace

Pro vyhodnocení vytvoříme další přímku. Tuto přímku využijeme pro vytvoření grafu rychlosti.

		1001 012 10	ouna pro uer	initer + j no un	oeovaer prim	ny	
Imána	Bod 1			Bod 2			Počet
Mama		Point 1			Point 2		vzorků
Name	Х	Y	Z	Х	Y	Ζ	Samples
Line 2	0	0.025	0.0005	0.25	0.025	0.0005	100

Tab. 8.9 Tabulka pro definici vyhodnocovací přímky



Obr. 8.20 Zobrazení teplotního pole, rovina 1 (Plane 1)

Velocity Contour 2	
1.458e-001	
1.312e-001	Noncommercial use only
1.166e-001	
1.020e-001	
8.746e-002	
7.288e-002	
5.830e-002	
4.373e-002	
2.9158-002	
1.458e-002	
0.000e+000	
[m s^-1]	

Obr. 8.21 Zobrazení střední rychlosti, rovina 1 (Plane 1)
Velocity u Contour 3					SVS
1.446e-001					DID
1.156e-001			Noncon	annereis	i use only
8.657e-002					
5.755e-002					
2.852e-002					
-4.981e-004					
-2.952e-002					
-5.854e-002					
8.757e-002	-	-	-	-	
1.166e-001					
-1.456e-001 [m s^-1]	Contraction of the				

Obr. 8.22 Zobrazení rychlosti ve směru osy X, rovina 1 (Plane 1)



Obr. 8.23 Zobrazení rychlosti ve směru osy Y, rovina 1 (Plane 1)



Obr. 8.24 Detailní zobrazení vertikální rychlosti na přímce č.2



45°C

Obr. 8.25 Detailní zobrazení vektorů rychlosti v oblasti teplé a studené stěny, rovina 1 (*Plane 1*)



Animaci kompletního procesu řešení druhé simulace si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad2\ soubor Priklad2_Video9.exe



ccl soubor programu *CFX-Pre*, který slouží k zapsání nastavení CFD simulace. **Rayleighovo číslo** slouží pro analýzu režimu proudění při přirozené konvekci. **Bousinesquova aproximace** slouží pro řešení vztlakových sil, se zanedbáním stlačitelnosti.



- 1. Jak je definováno Rayleighovo podobnostní číslo?
- 2. Které fyzikální parametry ovlivňují hodnotu Rayleighovo čísla?
- 3. Jakým způsobem se dá vytvořit vazba mezi simulacemi v projektu?
- 4. Jak je možné zkopírovat nastavení CFD simulace do jiné úlohy?
- 5. Jak je možné do simulace zahrnout dodatkovou kontrolu nerovnováhy u zákonu zachování?
- 6. Jak vysvětlíte rozdíly ve výsledcích u obou variant, proč je u druhé varianty několik zavíření?

9 STANOVENÍ MÍSTNÍ ZTRÁTY V MEZEŘE S NÁHLÝM ROZŠÍŘENÍM

9.1 VYTVOŘENÍ PROJEKTU CFD SIMULACE S MODELEM K-ε



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat model turbulence.
- definovat turbulentní parametry u okrajových podmínek.



Popis úlohy

V této kapitole stanovíme hodnotu místní ztráty v jednoduché oblasti, viz Obr. 9.1. Pro řešení použijeme modely turbulence k- ε , RNG k- ε , k- ω a *Shear Stress Transport (SST k*- ω).



Obr. 9.1. Schematický náčrt řešené oblasti s definicí problému Rozměry oblasti a okrajové podmínky

Délka oblasti	L = 5 m
Výška oblasti	d = 0.5 m
Výška schodu	$d_s = 0.2 \text{ m}$
Délka schodu	$L_s = 1 \mathrm{m}$
Rychlost na vstupu	v = 10 m/s
Statický tlak na výstupu	0 Pa (relativně)
Proudící tekutina	Vzduch

Definice Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{v D}{v}$$

kde v je rychlost, D je charakteristický rozměr oblasti a v je kinematická viskozita Výpočet Reynoldsova čísla na vstupu

$$Re = \frac{v (d - d_s)}{v}$$
$$Re = \frac{10 (0.5 - 0.2)}{15.55 \ 10^{-6}}$$

Re = 192926Jedná se tedy o turbulentní proudění

Definice CFD simulace

Pro výpočet použijeme celý projekt v příkladě č.1v kap 6. Celý postup výpočtu bude také identický, pouze místo modelu *Laminar* použijeme turbulentní modely *k-ɛ*, *RNG k-ɛ*, *k-ω* a *SST k-ω*. Nejprve si vytvoříme nový pracovní adresář *C:/Work/Priklad3* (nebo jiný podle uvážení uživatele). Spustíme program *Workbench* a pomocí ikony a otevřeme projekt *Priklad1.wbdb*. Následně ho pomocí ikony uložíme jako *Priklad3.wbdb* do nově vytvořeného adresáře *C:/Work/Priklad3*. Tím jsme vytvořili kopii, kterou je možné editovat, aniž by byl změněn původní projekt. Před tím, než začneme editovat položku setup, provedeme reset u položek solution a *Results*. Následně projekt kvůli pozdější lepší orientaci přejmenujeme z původního jména *Schod* na *Schod k-eps*. Jméno simulace v tomto projektu tak bude vždy zahrnovat také zkratku turbulentního modelu. Tím, že je proudění v oblasti turbulentní, musí se na vstupu definovat také intenzita turbulence, tj. jak rozvířený je proud tekutiny. Při definici turbulentního modelu jsou v základním zobrazení přístupné pouze 4 nejčastěji používané turbulentní modely. Plný výčet všech modelů je možné provést kliknutím na tlačítko solution turbulentního modelu, viz Obr. 9.2. Celkem je k dispozici 13 modelů. Pro výpočet použijeme čtyři modely turbulence. Jako první použijeme model *k-ɛ*.

A4 : Schod k-eps - CF	X-Pre	
a cur session in	🤊 (* 🚟 🎰 🕹 👌 A	; 🚾 sub
Dutline Domain: Fluid	d Dalveis 1	×
Basic Settings Fluid	Models Initialisation	
Heat Transfer		
Option	Isothermal 👻	
Fluid Temperature	25 [C]	
Turbulence		
Option	None (Laminar) -	
Combustion	None (Laminar) k-Epsilon	
Option	Shear Stress Transport	1
Thermal Radiation	SSG Reynolds Stress	-8-
Option	None 👻	

Obr. 9.2 Nastavení turbulentního modelu

Po definování turbulentního modelu je nutné upravit definici okrajových podmínek dle Tab. 9.1

		1401 711 14	tounta ontajo i jen pounin	en		
Okrajová p	oodmínka	Zákla	dní nastavení	Podrobné nastavení		
Insert Bo	oundary	Bas	ic Settings	Boundary Dete	ails	
Jméno	Oblast	Typ podmínky	Umístění			
Name ²⁾	$Domain^{1)}$	Boundary Type	Location			
Symmetry	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_LEFT		\searrow	
Left						
Symmetry	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_RIGHT		\searrow	
Right					\frown	
Inlet	Fluid	Inlet	INLET	Rychlost	$10 \mathrm{m/c}$	
				Normal Speed	10 11/8	
				Int. Turbulence	100/	
				Intensity	10%	
Outlet	Fluid	Outlet	OUTLET	Statický tlak	0De	
				Avr. Stat. Pressure	ora	

Tab. 9.1 Tabulka okrajových podmínek

Poznámka: 1) Pokud nebylo provedeno přejmenování oblasti na *Fluid*, bude zachováno standardní pojmenování *Default Domain*.

2) Jméno (Name) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování.

Modifikace okrajových podmínek se týká zejména vstupní okrajové podmínky. V našem případě použijeme základní volbu 10% (*High (Intensity = 10%)*). Turbulentní parametry na vstupu je možné definovat několika způsoby, ale pro náš cvičný příklad je toto určení dostačující. Úlohu je nutné před výpočtem inicializovat. Inicializaci provedeme kliknutím na ikonu to Poté se v pracovním okně zobrazí inicializační panel, viz Obr. 9.3. Pokud je použit turbulentní model, je nutné do inicializace zahrnout také turbulentní vírovou disipaci, je tedy nutné v položce *Turbulence* definovat nějakou volbu, pro jednoduchost zvolíme volbu *High Intensity and Eddy Viscosity*. Tato volba odpovídá intenzitě turbulence na vstupu 10%. Volbu potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*.

Global Settings		
Initial Conditions		
Velocity Type	Cartesian 🗸]
Cartesian Velocity (Components	-8-
Option	Automatic with Value 👻	
U	5 [m s^-1]	
v	0 [m s^-1]	
W	0 [m s^-1]	
Static Pressure		
Option	Automatic with Value 👻	
Relative Pressure	0 [Pa]	
Turbulence		Ξ
Option	High Intensity and Eddy Visc 👻	

Obr. 9.3 Zobrazení inicializace

Nyní zbývá ještě definovat nastavení řešiče. Definování provedeme kliknutím na ikonu \bowtie . Následně se v pracovním okně zobrazí základní okno se standardním nastavením, viz Obr. 6.45. U tohoto jednoduchého příkladu budeme měnit pouze počet iterací na 200 a ostatní volby ponecháme. Nastavení potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Následně můžeme *CFX-Pre* ukončit a vyřešit úlohu. Ve *Workbench* aktualizujeme projekt \checkmark Update Project. Tím vyřešíme úlohu a načteme výsledkový soubor do položky Results.



Animaci modifikace projektu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video1.exe •



Animaci řešení úlohy si může student zobrazit

- odkazem ANIMACE •
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video2.exe •

9.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ CFD SIMULACE S MODELEM Kε



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat vyhodnocovací vzorec.
- vytvořit vyhodnocovací tabulku.



VÝKLAD

D Tvorba vyhodnocovací roviny a přímky

Pro vyhodnocení výsledku vytvoříme rovinu, která bude podélným řezem výpočtové oblasti. Dále si vytvoříme přímku, která bude sloužit jako zdroj dat pro graf (rychlostní profil). Menu pro tvorbu geometrických entit vyvoláme pomocí ikony **blocation**. Dle následující tabulky vytvoříme vyhodnocovací rovinu a přímku (podrobný návod viz kap. 6.6). Přímka bude sloužit k vyhodnocení bodu připojení a rovina pro vytváření vektorových polí a konturovaných obrázků.

]	Гаb. 9.2 Tabu	ılka pro defin	ici vyhodnoc	ovací přímky	7	
Jméno Name		Bod 1			Počet		
		Point 1			vzorků		
	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Samples
Line 1	0	0.01	0.005	3	0.01	0.005	100

Tal	o. 9.3 Tabulka	pro definici vyl	nodnocovací roviny	
	Jméno Name	Metoda Method	Souřadnice X	

XY Plane

0.005

D Zobrazení kontur rychlosti a teploty

Plane 1

Pokud máme vytvořeny vyhodnocovací entity, můžeme přistoupit k zobrazování výsledků. Nejprve si zobrazíme teplotní a rychlostní pole. Návod pro nastavení je podrobně popsán v kap. 6.6.

1 ab. 9.4 1 abulka pro definici konturovanych obrazku							
Vložení obrázku		Základní nastavení					
Insert Contour		Geometry					
Jméno	Umístění	Veličina	Rozsah				
Name ¹⁾	Location	Variable	Range				
Velocity	Plane 1	Velocity	Global				
TKE	Plane 1	Turbulence Kinetic Energy	Global				
Static Pressure	Plane 1	Pressure	Global				

Tab. 9.4 Tabulka pro definici konturovaných obrázků

Poznámka: 1) Jméno (Name) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování

Vytvoření grafu

Další vyhodnocení bude spočívat v odhadu vzdálenosti bodu připojení od náhlého rozšíření. Provedeme tedy vyhodnocení podélné složky rychlosti v blízkosti dolní stěny, viz Obr. 9.1, vyhodnocovací přímka je již definována viz Tab. 9.2. Graf vytvoříme stejně jako u předchozích příkladů viz např. kap. 6.6. Data nezbytná pro plné definování grafu jsou uvedena v následující tabulce.

	1 u.o.	7.5 Tubulku p	io definier gru	u.	
Vložení grafu	Graf		Graf přímka	1	
Insert Chart	Chart		Chart Line 1		
				Osa X	Osa Y
Jméno	Název	Typ grafu	Umístění	X Axis	Y Axis
<i>Name</i> ¹⁾	Title	Туре	Location ²⁾	Veličina	Veličina
				Variable	Variable
Chart 1	Velocity	XY	Line 1	X	Velocity v

Tab. 9.5 Tabulka pro definici grafů.

Poznámka: 1) Jméno (Name) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování.
2) Pokud byla přímka pojmenována jinak, je jméno umístění jiné.

ANIMACE

Animaci analýzy výsledků si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video3.exe

Gamma Stanovení hodnoty místní ztráty

Dle zadání máme vyhodnotit místní ztrátu ξ při použití čtyř turbulentních modelů. Místní ztráta je definována vztahem:

$$\xi = \frac{p_{tot vstup} - p_{tot výstup}}{p_{dyn vstup}}$$

Pro výpočet místní ztráty je tedy nutné z výsledku zjistit na vstupu (*Inlet*) hodnotu totálního a dynamického tlaku a na výstupu (*Outlet*) hodnotu totálního tlaku. Hodnoty je možné vyčíslit pomocí nástroje funkční kalkulačka (*Function Calculator*). Pomocí tohoto nástroje je možné vyčíslení různých veličina a parametrů. Tento nástroj je možné spustit v záložce *Calculators*—*Function Calculator*, viz Obr. 9.4.

Použití nástroje si ukážeme na vyčíslení totálního tlaku na vstupu

- Function zde nastavíme typ funkce, kterou chceme vyhodnotit, tj. Průměr, Vážený průměr, Min a Max hodnotu atd. Vybereme funkci Průměr vážený hmotnostním tokem (*massFlowAve*). Tato funkce stanoví průměr veličiny s přihlédnutím k toku proudící tekutiny.
- Location zde nastavíme entitu, na které chceme provést vyčíslení, v našem případě tedy vstup (*Inlet*).

Variable – zde nastavíme proměnnou, pro kterou chceme provést vyčíslení, v našem případě tedy totální tlak (*Total Pressure*).

Result – v tomto políčku je vyčíslen výsledek

Po tomto nastavení je nutné v dolní části stisknout tlačítko pro výpočet *Calculate*. Následně by se měla v kolonce výsledek (*Result*) vyčíslit počítaná veličina. Stejným postupem je možné obdržet ostatní veličiny nezbytné pro výpočet místní ztráty ξ .

Poznámka: Program CFX nepoužívá veličinu dynamický tlak, proto je nutné dynamický tlak vyčíslit jako rozdíl totálního a statického tlaku.

CFD-Post: (:\Work\Priklad3\Priklad3_files\dp0\CFX\CFX\Schod_001.res	i Variable Selector	? X
File Edit Se	ession Insert Tools Help		
Outline Va	Image: Second Seco	Specific Heat Capacity at Constant Press. Specific Heat Capacity at Constant Volume Specific Volume Static Enthalpy Static Entropy	re 🔺
Macro		Temperature	
Mesn C	Laiculator	Thermal Conductivity	
J Function	on Calculator	Total Pressure	
		Turbulence Eddy Dissipation Turbulence Eddy Frequency Turbulence Kinetic Energy Velocity Velocity u Velocity u Velocity u.Beta	
Function Cal	culator	Velocity u.Gradient	
		Velocity u.Gradient X	
Function	massFlowAve 👻	Velocity u.Gradient Y	=
		Velocity u.Gradient Z	
Location	Iniet 🔹 🔪	Velocity v	
Case	Schod k eps	Velocity v.Beta Velocity v.Gradient	
		Velocity v.Gradient X	
Variable	Total Pressure 🔹	Velocity v.Gradient Y	
Direction		Velocity v.Gradient Z	
Direction		Velocity w	
Fluid	All Fluids	Velocity w.Beta	
		Velocity w.Gradient	
		Velocity w.Gradient X	
Results		Velocity w.Gradient Y	
Mass Flow A	verage of Total Pressure on Inlet	Velocity W.Gradient Z	
1035 HOW A	verage of rotar ressure on filler	Velocity, Absolute Helicity	
35.8669 [Pa]		Velocity.Curl V	
		Velocity Curl Y	
		Velocity Ourl 7	-
		ОК	Cancel

Obr. 9.4 Spuštění nástroje Funkční kalkulačka

U Vytvoření vyhodnocovacího vzorce

Další možnost, jak vyčíslit hodnotu místní ztráty, je definice algebraického vztahu, který provede vyčíslení automaticky. Vzorec vytvoříme pomocí nástroje pro definici vzorců. Nástroj spustíme kliknutím na ikonu kliknutím

Pro vyhodnocení budeme používat funkci Průměr vážený hmotnostním tokem (*massFlowAve*). Syntaxe této funkce je následující-*massFlowAve* ()@

Do závorky se umístí vyhodnocovaná veličina (*např. statický tlak*), za zavináč se umístí lokace (např. *Inlet*). Definici tedy provedeme následujícím způsobem:

- vyvoláme menu pomocí pravého tlačítka, zvolíme funkci massFlowAve. V okně by se měl zobrazit následující text: massFlowAve()@. Functions→CFX-Post→massFlowAve.
- 2) Kurzor umístíme do závorek () a pravým tlačítkem vyvoláme opět menu a zvolíme proměnou totální tlak, *Variables→Total Pressure*.

3) Kurzor umístíme za zavináč @, vyvoláme menu a zvolíme lokaci, tedy entitu, na které chceme vyčíslit hodnotu totálního tlaku. *Locations→Inlet*.

Po provedení by měl vypadat texť v poli takto: *massFlowAve(Total Pressure)@Inlet*. Tím je tedy definován totální tlak na vstupu. Podle vzorce pro místní ztrátu máme nyní odečíst od této hodnoty totální tlak na výstupu. Pomocí numerické klávesnice tedy napíšeme mínus – a nadefinujeme obdobně průměr totálního tlaku na výstupu. Po této definici by měl vypadat vzorec takto: *massFlowAve(Total Pressure)@Inlet -massFlowAve(Total Pressure)@Outlet*. Tento rozdíl musíme vydělit hodnotou dynamického tlaku na vstupu. Text tedy uzavřeme do závorek a () a vepíšeme pomocí numerické klávesnice za závorku znaménko zlomku /. Následně budeme definovat hodnotu dynamického tlaku na vstupu. Jak již bylo řečeno výše, *Ansys CFX* nepoužívá veličinu dynamický tlak, bude tedy nutné definovat do funkce *massFlowAve()@* veličinu jako rozdíl totálního a statického tlaku. Po definování dynamického tlaku by měl vypadat text takto:

(massFlowAve(Total Pressure)@Inlet -massFlowAve(Total Pressure)@Outlet)/ massFlowAve(Total Pressure)@Inlet.

Tím je tedy plně definován vzorec pro místní ztrátu. Nyní potvrdíme definici tlačítkem *Apply*. Po potvrzení se v políčku *Value* vyčíslí hodnota dle vzorce včetně jednotek (místní ztráta je bezrozměrnánezobrazí se tedy jednotka).



Obr. 9.5 Definování nové veličiny

Dále budeme definovat hodnotu Re čísla na vstupu do oblasti. Jelikož se v programu *Ansys CFX* nepoužívá veličina kinematická viskozita, je nutné použít definici s viskozitou dynamickou.

$$Re = \frac{\rho v (d - d_s)}{\eta}$$

kde ρ je hustota a η je dynamická viskozita.

Postupem obdobným s předchozím odstavcem vložíme vzorec pro Re číslo. Pojmenování vzorce bude *Re* a textová definice bude vypadat následovně:

massFlowAve(Density)@Inlet * massFlowAve(Velocity)@Inlet*(maxVal(Y)@Inlet minVal(Y)@Inlet)/massFlowAve(Dynamic Viscosity)@Inlet

Hodnota velikosti vstupu, tedy charakteristický rozměr, je definována jako max. hodnota Y souřadnice – min hodnota Y souřadnice na vstupu.

Dále si ještě vyhodnotíme tlakovou ztrátu. Jelikož je výpočtová oblast principiálně difuzor, bude hodnota tlakového spádu záporná (protože se kapalina zpomaluje, musí narůstat tlak). Pojmenování bude *Deltap* a vzorec pro tlakový spád je následující:

 $\Delta p = p_{stat vstup} - p_{stat výstup}$

Vzorec definovaný v postprocesoru bude mít následující tvar:

massFlowAve(Pressure)@Inlet -massFlowAve(Pressure)@Outlet

Vytvořené vzorce je možné kdykoli editovat nebo zobrazit výsledek v záložce Expressions.

Poznámka: text vyhodnocovacího vzorce je možné psát i ručně (je nutné znát přesně syntaxe jednotlivých funkcí). Není tedy nutné používat menu a vždy vybírat jednotlivé funkce.

Vytvoření vyhodnocovací tabulky

Z důvodu lepší přehlednosti si můžeme vytvořit tabulku, která je principiálně shodná s *MS EXCEL*. V této tabulce si vyobrazíme číselně všechny tři vzorce a provedeme také textový popis. Tabulku

vložíme pomocí ikony \blacksquare . Ponecháme standardní pojmenování *Table 1* a potvrdíme *Ok*. Po potvrzení se v grafickém okně zobrazí tabulka, viz Obr. 9.6.

	Outline Variables Expressions Calculators Turbo Image: CP Wireframe Image: CP Wireframe </th <th>nsert: f</th> <th>Function + 🕡 Expr</th> <th>I ∐ ≣ ≣ ≣ ssion + X Variable</th> <th>■ 🕸 🖬 🗛 🗚</th> <th>C Constant +</th> <th>Annotation +</th>	nsert: f	Function + 🕡 Expr	I ∐ ≣ ≣ ≣ ssion + X Variable	■ 🕸 🖬 🗛 🗚	C Constant +	Annotation +
Insert Table	Ø Ø	Table 1	-				
me Table 1		E A 1	в₿	c	D	E	F
	Details of Table 1	2					
Cancel	Caption	5				-	
		7 8					
		9 10					
		12	1				
		14 15					
		16 17					
		18					

Obr. 9.6 Definování tabulky

Do jednotlivých buněk můžeme vkládat libovolný text, vkládat odkazy na dříve vytvořené vzorce a vytvářet vzorce stejně jako v editoru vzorců *Expressions*.

Do buněk sloupce A umístíme textový popis funkce a sloupce B umístíme odkaz na veličinu definovanou pomocí vzorce.

Do jednotlivých buněk sloupce *B* si nyní vložíme příslušnou veličinu. Vložení je možné provést třemi způsoby:

- napsat = a jméno vzorce např. u buňky *B2* definujeme tlakovou ztrátu, takže text v buňce bude =*Deltap*, což je název vyhodnocovacího vzorce. Po stisknutí klávesy *Enter* se v buňce objeví hodnota tlakové ztráty včetně jednotky.
- napsat = a pravým tlačítkem vyvolat menu a v položce *Expressions* najít daný vzorec. Postup definice pro buňku *B3*, viz Obr. 9.7
- Napsat = a v buňce definovat přímo daný vzorec stejně jako při definování vzorce. Např. v buňce B2 by tedy mohl být text = massFlowAve(Pressure)@Inlet -massFlowAve(Pressure)@Outlet. V tomto případě není nutné definovat vzorec.

	A	В			С			D	E	F
1	Vysledky									
2	Mistni ztrata	2.	118e-0)1						
3	Reynoldsovo cislo	=	_				1			
4			f≈	Function	s	•				
5			v	Expressi	ons	•		Accumulated Tin	ne Step = 183	Ī
6			X	Variables		•		Current Time St	ep = 183	
7			6	Location	s	•		Delta p = massF	lowAve(Pressure	
8			с	Constant	ts	•		Dzeta = (massF	lowAve(Total P	
9			ABC	Annotati	Annotations			Re = mas Flow	Ave(Density)	
10		_	-	Edit		•		Reference Press	sure = 1 [atm]	
11		_		Luit				Sequence Step	= 183	
12		_						Time = 0 [s]		
13		_						atsten = Accum	ulated Time Ste	
14		_						atatep - Accum		
15								ctstep = Curren	t Time Step	
16								sstep = Sequen	ce Step	
17								t = Time		
18							_			-

Obr. 9.7 Definice veličiny v buňce

Po definování odkazů na vzorce v buňkách sloupce B je ještě možné provést úpravu zobrazení čísla dle požadavku uživatele. Úpravu provedeme kliknutím na ikonu 🗐. Pomocí tohoto nástroje je možné upravit formát čísla a počet platných číslic. Výsledná tabulka by mohla tedy vypadat dle Obr. 9.8

	A	В
1	Vysledky	
2	Mistni ztrata	0.2118
3	Reynoldsovo cislo	194100
4	Tlakova ztrata	-23.32 [Pa]

Obr. 9.8 Kompletně definovaná tabulka.

Předchozím krokem jsme dokončili vyhodnocení pro model k- ε . Nyní uložíme vyhodnocovací soubor *File* \rightarrow *Save State*. Následně *CFD-Post* ukončíme a uložíme celý projekt ve *Workbench*.



Animaci tvorby vyhodnocovacích vzorců a tabulky si může uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video4.exe

9.3 VYTVOŘENÍ DALŠÍ SIMULACE S MODELEM RNG K-ε V PROJEKTU



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• zobrazit plný seznam turbulentních modelů.



VÝKLAD

Abychom nemuseli nastavovat veškeré parametry znovu, využijeme opět jazyk CCL (*CFX Command Langue*). Dvojklikem na položku setup znovu spustíme *CFX-Pre*. Po načtení úlohy spustíme kliknutím na ikonu doho pro export nastavení. V levé části okna je zobrazen standardní panel pro uložení, tj. jméno souboru, typ souboru a místo uložení. Zvolíme jméno *Schod_k-eps*, a soubor uložíme do pracovního adresáře pro příklad č.3. *C:/Work/Priklad3*. V pravé části obrazovky je zobrazen kompletní strom simulace. Výběrem položek v tomto stromu můžeme určit, které položky budou v exportovaném souboru. V našem případě chceme uložit opět celou simulaci, proto zvolíme položku strom zbarvit modře, což znamená, že položky jsou vybrány. Nyní můžeme soubor uložit příkazem *Save*. Postup je zobrazen na Obr. 9.9. Nyní můžeme *CFX-Pre* ukončit.



Obr. 9.9 Operace exportu souboru CCL pro model k-Epsilon

Původní variantu výpočtu již máme kompletně vypracovánu a nyní chceme projekt rozšířit o další variantu. Do projektu přesuneme položku ⁽¹⁾ CFX z nástroje *Component Systems*. Tím vložíme do projektu novou položku CFX, která ale nebude obsahovat geometrii ani síť. Pro lepší orientaci si obě simulace přejmenujeme. Původní simulaci přejmenujeme *Schod variantal* a novou simulaci přejmenujeme z původního názvu CFX na *Schod RNG k-eps*.

Nyní provedeme sdílení sítě mezi oběma variantami. Tyto položky budou totiž u obou simulací identické. V první simulaci vybereme levým tlačítkem myši položku Mesh a při stále stisknutém tlačítku přesuneme tuto položku na položku setup u druhé simulace. Položka setup u druhé simulace by se měla v tuto chvíli změnit. V položce se objeví text *Transfer A3*. V tuto chvíli je možné levé tlačítko uvolnit. Následně se v projektu objeví modrá spojnice, která naznačuje vazbu mezi jednotlivými simulacemi.



Obr. 9.10 Vytvoření sdílené sítě mezi dvěma simulacemi.

V druhé simulaci je tak již načtena síť a můžeme začít definovat simulaci dvojklikem na položku setup druhé simulace. Po spuštění simulace bude načtena síť a bude vytvořena defaultní okrajová podmínka pro doménu a stěnu. Tuto oblast nyní odstraníme. Levým tlačítkem vybereme položku Default Domain a pravým tlačítkem vyvoláme kontextové menu, ve kterém vybereme \times Delete. Tím odstraníme defaultně vytvořené položky simulace. Nyní spustíme import souboru CCL ikonou Vybereme soubor *Schod_k-eps.ccl.* z adresáře *C:/Work/Priklad3.* V okně ještě zkontrolujeme nastavení. V pravé části zvolíme volbu nahradit (*Replace*). Import CCL souboru spustíme tlačítkem *Open.* Po importu bude defacto zkopírováno nastavení simulace v první variantě. V nastavení změníme pouze model turbulence z původního $k-\varepsilon$ na *RNG k-ɛ*. Tento model ale není zobrazen v základním seznamu, proto je nutné model vybrat z kompletního seznamu, který zobrazíme prostřednictvím tlačítka viz Obr. 9.11.

File Edit Session Insert Tools Help		Option P X
Image Image <t< th=""><th>™ ™ 7≈</th><th>None (Laminar) k-Epsilon</th></t<>	™ ™ 7 ≈	None (Laminar) k-Epsilon
Details of Fluid in Flow Analysis 1 Basic Settings Fluid Models Initialisation	Vi	Shear Stress Transport BSL Reynolds Stress SSG Reynolds Stress
Heat Transfer Option Isothermal		k epsilon EARSM Zero Equation RNG k-Epsilon
Fluid Temperature 25 [C] Turbulence	-8-	k-Omega Eddy Viscosity Transport Equation BSL
Option KEpsilon Wall Function Scalable		BSL EARSM LRR Reynolds Stress QI Reynolds Stress
Advanced Turbulence Control	⊡	Omega Reynolds Stress
Option None	_	
Option None		

Obr. 9.11 Zobrazení plného seznamu dostupných turbulentních modelů.

Zvolíme model *RNG k-ɛ*a volbu potvrdíme tlačítkem *OK*. Všechny ostatní okrajové podmínky zůstanou zcela identické, tak aby bylo možné výsledky obou modelů srovnatelné. Poslední krok bude spočívat ve zvýšení počtu iterací z původní hodnoty 200 na 300. Tím je nastavení druhé simulace ukončeno. Soubor uložíme a program *CFX-Pre* ukončíme.

Následujícím krokem bude vyřešení druhé simulace. Ve *Workbench* stiskneme tlačítko ⁷ Update Project</sup>. Spustí se tak řešení simulace a následné zapsání souboru s výsledky.

Abychom nemuseli znovu definovat všechny položky jako u první simulace použijeme stejně jako u předchozího příkladu soubor *.cst z první simulace, kde jsou vytvořeny všechny obrázky, grafy, vyhodnocovací vzorce a tabulka. U první simulace vyvoláme kontextové menu a vybereme položku *Properties*. Následně se v pravé části zobrazí okno se systémovým názvem první simulace. Systémové jméno je *CFX*. Dle toho jména je možné nalézt adresář s jednotlivými položkami simulace. Dvojklikem na položku **@** Results u druhé simulace spustíme program *CFX-Post*. Po načtení výsledků nebudeme vytvářet roviny, přímky a pod, ale otevřeme vyhodnocovací soubor pomocí ikony

• V následně otevřeném okně vybereme adresář *C:/Work/Priklad3/Priklad3_files/dp0/CFX/Post*, ten by měl obsahovat jediný soubor s příponou *.cst. Tento soubor vybereme a stiskneme tlačítko *Open*. Následně se spustí proces definice vyhodnocovacích položek, které budou identické jak u první simulace. Tímto krokem jsme do druhé simulace zkopírovali vyhodnocení první simulace. Po prohlédnutí výsledků můžeme program ukončit a celý projekt ve *Workbench* uložit.



Animaci vytvoření další simulace s modelem RNG k-ɛ si může uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video5.exe

9.4 VYTVOŘENÍ SIMULACÍ PRO MODELY K-ω A SST K-ω



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• duplikovat CFD simulaci v projektu.



VÝKLAD

Po definování druhé simulace, která využívá sdílenou síť, si nyní ukážeme postup při duplikaci simulace. Druhá simulace obsahuje pouze tři položky setup, solution a Results. V simulaci pojmenované *Schod RNG k-eps* jsou plně definovány všechny položky. Jediné, co bychom chtěli změnit, je turbulentní model. Z tohoto důvodu si ukážeme jak duplikovat simulaci jako celek, aniž by bylo nutné vkládat do simulace novou položku CFX z nástroje *Component Systems*. U druhé simulace pojmenované *Schod RNG k-eps* vybereme položku CFX a levým tlačítkem vyvoláme kontextové menu. Následně zvolíme možnost *Duplicate*. Následně se vytvoří duplikát simulace i s vazbou na síť u první simulace. Nyní změníme jméno z původního *Copy of Schod RNG k-eps* na *Schod k-omega*. Stejným způsobem vytvoříme další kopii, kterou pojmenujeme *Schod SST*. Abychom vymazali předchozí výsledky u duplikovaných simulací, provedeme reset u položek Solution v nově vytvořených simulacích *Schod k-omega* a *Schod SST*. Postup je uveden na Obr. 9.12.





Nyní stačí pouze spustit *CFX-Pre* pomocí položky setup a podle názvu simulace změnit turbulentní model na k- ω , respektive *Shear Stress Transport*, stejným způsobem jako u druhé simulace viz Obr. 9.11. U obou simulací dále zvětšíme počet iterací z původní hodnoty 300 na 500. Obě simulace uložíme a program *CFX-Pre* ukončíme. Po nastavení simulací spustíme řešení simulací

tlačítkem ⁷ Update Project</sup>. Spustí se tak řešení simulace *Schod k-omega* a zapsání souboru s výsledky, následně se spustí automaticky řešení simulace *Schod SST* a zapsání souboru s výsledky. Po vyřešení obou simulací si můžeme zobrazit výsledky pouhým dvojklikem na položku ⁹ Results . Jelikož jsme provedli duplikaci simulace, do které již byl zkopírován vyhodnocovací soubor, byl prostřednictvím duplikace zkopírován tento vyhodnocovací soubor do rovněž do duplikovaných simulací a není nutné manuálně načítat vyhodnocovací soubor z první simulace.



Animaci vytvoření další simulace s modelem RNG k-Epsilon si může uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video6.exe

9.5 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH TURBULENTNÍCH MODELŮ



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- exportovat data z grafu do souboru spustitelného v MS Excel.
- načíst data do v MS Excel a srovnat graficky bod připojení.



VÝKLAD

Data z grafu je možné exportovat do souboru *.csv a následně je vyhodnotit např. v programu *MS Excel* a podobně. Export se provede pomocí tlačítka *Export* v dolní části okna pro definici grafu, viz Obr. 9.13.

General	Data Series	X Axis	Y Axis	Line Display	Chart	4
Туре	 XY XY - Tra Histogram 	ansient or S am	equence			
Title	Bod pripoje	eni				
Report						
Caption						
					Ŧ	



Abychom mohli provést srovnání jednotlivých grafů v *MS Excel*, musíme vytvořit datové soubory u jednotlivých simulací. Postupně tedy budeme spouštět *CFD-Post* u jednotlivých simulací. Následně vybereme položku Chart 1 a pomocí tlačítka *Export* vygenerujeme datový soubor s hodnotami,

které jsou použity v grafu. Soubor je vygenerován v univerzálním formátu *.csv, tj. text oddělený čárkou. Soubor následně pojmenujeme tak, aby obsahoval jméno turbulentního modelu např. *k-eps*. Soubor uložíme do pracovního adresáře *C:/Work/Priklad3*.

General	Data Series X Axis Y Axis Line Display	Chart 4 🕨			
Туре	XY XY - Transient or Sequence Histogram				
Title	Bod pripojeni				
Report					
Caption					
C Fast F	ourier Transform	±			
Apply	Export Reset	Defaults			
S Export			Bod y	2	x
Second Export	C:\Work\Priklad3		Body		×
Export Look in:	C:\Work\Priklad3 Compu a Priklad3_files.backup Captivate Priklad3_files		Bad y		
Export Look in: Katk	C:\Work\Priklad3 Compu a Captivate Priklad3_files Priklad3_files		Bool o	Save	

Obr. 9.14 Export dat z grafu u modelu k-Epsilon

Tento postup budeme opakovat i pro ostatní turbulentní modely. Po načtení dat do programu *MS Excel* je možné určit bod připojení analýzou datových řad. Bod připojení nalezneme tak, že rychlost u změní znaménko. Znamená to, že před tímto bodem proudí kapalina do oblasti zavíření, a za tímto bodem proudí směrem k výstupu.

Ze srovnání je zřejmé, že vliv modelu turbulence není zanedbatelný. Při jeho volbě je nutné postupovat uváženě a opírat se o vlastní zkušenosti a také doporučení, která jsou uvedena v manuálu programu. Výsledky jsou také ovlivněny jemností sítě, ale pro naše cvičné úkoly je kvalita postačující.

Tab. 9.6 Srovnání hodnoty místní ztráty a bodu připojení pro čtyři modely turbulence

Model turbulence	Místní ztráta	Bod připojení ¹⁾	
	- 162		
	- 163		

	ξ[-]	[m]
k-ɛ	0.2118	1.32
RNG k - ε	0.2037	1.57
k-w	0.2108	1.35
Shear Stress Transport k- ω	0.2050	1.44

1) Vzdálenost je určena od náhlého rozšíření, tj. od náhlého rozšíření se proud tekutiny znovu přimkne k dolní stěně po uražení této vzdálenosti.



Bod připojení

Obr. 9.15 Grafické srovnání bodu připojení

ANIMACE

Animaci exportu dat a jejich vyhodnocení v MS Excel si může uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video7.exe

9.6 DEFINOVÁNÍ VSTUPNÍ RYCHLOSTI POMOCÍ VZORCE A TABULKOU



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat okrajovou podmínku algebraickým vztahem.
- definovat okrajovou podmínku tabulkou.



VÝKLAD

U Vytvoření lineárního profilu rychlosti

Ne vždy je možné definovat okrajovou podmínku pouze pomocí konstanty. V tomto případě je možné definovat libovolný parametr okrajové podmínky algebraickým vztahem v programu *CFX*, jde o *CEL-Expression*. Pro tuto definici použijeme příklad s modelem k- ε . V projektu vytvoříme další simulaci a pojmenujeme ji *Schod k-eps lineární profil* a dále nasdílíme síť z první simulace. Pro nastavení použijeme *ccl soubor vygenerovaný z první simulace.

První případ se bude zabývat definicí rychlosti dané lineárním vztahem. Rychlostní profil je definován na následujícím obrázku Obr. 9.16



Obr. 9.16 Grafické znázornění lineárního rychlostního profilu

Algebraický vztah definujeme pomocí ikony 🚾. Po kliknutí na tuto ikonu je nutné nejprve provést pojmenování vztahu, vztah tedy pojmenujeme výrazem *Velprof*. Po potvrzení jména se objeví v levé části obrazovky okno pro definici algebraického vztahu.



Obr. 9.17 Grafické znázornění vytvoření algebraického vztahu

Profil je nutné definovat na základě předpokládaného vztahu a zvoleného souřadného systému. V našem případě je tedy profil na Obr. 9.16 definován vztahem v = 33.33 y - 6.66 (y je souřadnice). Program *Ansys CFX* provádí výpočty včetně jednotek, je tedy nutné vždy provést plnou definici vztahu, tj. včetně jednotek. Jelikož se jedná o rychlost, musí tak být výsledek v jednotce [m/s]. Vztah definujeme způsobem obdobným jako u definování vyhodnocovacího vzorce. V okně pro definici vztahu je možné vyvolat menu, které obsahuje veškeré veličiny, jež je možné ve vztahu použít.

Definition	Plot	Evalu	ate		
33.33 <i>[s^-1</i>]	7*				
			f∗	Functions	- F
			Vac	Expressions	•
			X	Variables	•
				Mesh Locators	•
				Physics Locators	•
			с	Constants	•
				Edit	•
Apply			_		Reset

Obr. 9.18 Menu pro vytvoření algebraického vztahu

Variables	– zde je seznam všech veličin řešených v simulaci, (souřadnice x,y,z, rychlost,
	tlak atd.)
Expressions	– zde je seznam již napsaných vztahů. Vzorec je možné definovat pomocí
	dalších vzorců. Vhodné u komplikovaných funkčních závislostí
Locators	 zde je seznam všech okrajových podmínek
Functions	– zde je seznam všech dostupných matematických funkcí (sin, cos, exp atd.)
Constants	- zde je seznam základních fyzikálních veličin (Univerzální plynová
	konstanta R, π atd.)

Vzorec tedy napíšeme následujícím postupem:

- 1. nejprve vepíšeme numerické číslo 33.33
- 2. vložíme mezeru a napíšeme jednotku do hranatých závorek [s^-1]
- 3. vložíme znaménko násobení * a následně z menu vybereme proměnnou veličinu y
- 4. vepíšeme -6.66, vložíme mezeru a definujeme jednotku [$m s^{-1}$]

Jednotku definujeme pomocí základních jednotek, nepoužíváme základní matematické operace (násobení), ale mezi znaky vkládáme mezeru a definujeme pouze mocniny.

Text v okně by měl tedy vypadat následovně: $33.33 \sim [s^{-1}]*y-6.66 \sim [m \sim s^{-1}]$, kde symbol ~ je mezera vložená klávesnicí. Po potvrzení definice *Apply* se vzorec objeví také v seznamu vztahů, viz Obr. 9.19.



Obr. 9.19 Zobrazení definovaného vztahu

Pomocí záložek u definičního okna je možné provést kontrolu vztahu a vyhodnocení libovolného výsledku vztahu. Nyní se tedy přepneme do záložky *Plot*. Zde je možné graficky vyobrazit funkční závislost v daném rozsahu proměnné.



Obr. 9.20 Grafické znázornění definovaného vztahu

Při grafické definici zaškrtneme danou proměnnou veličinu, v našem případě y, a následně můžeme definovat rozsah grafu. Rychlostní profil je definován na ploše Vstup (INLET), z toho vyplývá, že souřadnice y je v rozmezí 0.2-0.5 m. Tyto hodnoty pak definujeme do políček *Start a End of Range*, po vyplnění rozsahu stiskneme tlačítko *Plot Expression*. Následně se zobrazí grafické vyjádření vztahu. Pokud chceme upravit rozsah, stiskneme tlačítko *Define Plot* a vrátíme se do předchozího definičního okna. V grafu jsou také vidět jednotky: souřadnice y je v jednotkách [m] a veličina *Velprof* je v jednotkách [m/s].

Vztah (*Velprof*) dle zadání použijeme pro definici rychlosti ve vstupní okrajové podmínce *Inlet*. Normální zobrazení se provede přepnutím do záložky *Outline*. Editujeme okrajovou podmínku *Inlet* a v záložce *Boundary Details* upravíme definici rychlosti. Nyní je rychlost definována číselně 10. Klikneme tedy do pole tak, jako bychom chtěli číselnou hodnotu změnit. V tu chvíli by se měla vedle

bílého políčka pro definici rychlosti objevit ikona 🚾. Na tu tedy klikneme a do bílého pole vepíšeme jméno vzorce v našem případě *Velprof*. Takto je tedy definován rychlostní profil pomocí matematického vztahu. Volbu potvrdíme *Apply*. Následně úlohu uložíme.

Stanovení místní ztráty v mezeře s náhlým rozšířením

Outline Expression	s Boundary: Inlet	×	Outline Expressio	ns Boundary: Inlet	×
Details of Inlet in Fluid i	in Flow Analysis 1		Details of Inlet in Fluid	in Flow Analysis 1	
Basic Settings Bou	undary Details Sources	Plot Options	Basic Settings Bo	oundary Details Sour	rces Plot Options
Flow Regime			-Flow Regime		
Option	Subsonic	-	Option	Subsonic	•
Mass And Momentum	1		Mass And Momentu	m	
Option	Normal Speed	-	Option	Normal Speed	•
Normal Speed	10 m s^	-1 🔻 🗖	Normal Speed	Velprof	
Turbulence	v0		Turbulence		
Option	High (Intensity = 10%)	•	Option	High (Intensity = 1	0%) 👻

Obr. 9.21 Definování rychlostí zadaným vztahem Velprof

Stejným způsobem je možné definovat i jiné veličiny. Možnost definice veličiny vztahem je signalizována ikonou wedle pole pro číselnou definici veličiny. Vztah je možné kdykoli deaktivovat odkliknutím ikony a definováním veličiny číselně.

Úlohu vyřešíme, a následně analyzujeme výsledky. Výsledkový soubor nakopírujeme z první simulace, tedy z adresáře C:/Work/Priklad3/Priklad3_files/dp0/CFX/Post

ANIMACE

Animaci definice algebraického vztahu a použití v okrajové podmínce *INLET* si může uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video8.exe



Animaci řešení úlohy s rychlostí definovanou algebraickým vztahem a analýzu výsledku si může uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video9.exe

Vytvoření parabolického profilu rychlosti

Z cvičných důvodů si provedeme další výpočet, ale nyní bude rychlostní profil na vstupu parabolický. Provedeme tak duplikaci simulace *Schod k-eps lineární profil*. Následně přejmenujeme simulaci z původního jména na *Schod k-eps mocniny profil*.



Obr. 9.22 Grafické znázornění parabolického rychlostního profilu

Spustíme CFX-Pre a vzorec Velprof modifikujeme

Matematická definice profilu $V = -444.4 y^2 + 311.11 y - 44.44$ Definice vzorce v *CFX*-Pre -444.4~[m^-1~s^-1]*y^2+311.11~[s^-1]*y-44.44~[m~s^-1] Modifikaci potvrdíme a následně ukončíme *CFX-Pre*. Resetujeme výsledky, vyřešíme úlohu a analyzujeme výsledky.



Animaci definice úlohy s mocninným profilem rychlosti na vstupu, řešením a analýzou výsledku si může uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video10.exe

Definice okrajové podmínky tabulkou

Další možnost jak definovat okrajové podmínky je využití změřených dat. V tomto případě na vstupu budeme definovat okrajovou podmínku na základě změřených dat. Tímto způsobem jsou okrajové podmínky definovány nejpřesněji. Rychlostní profil je nutné zapsat ve formátu *.csv, tj. text oddělený tabulátory. Příklad tohoto profilu je znázorněn na následujícím obrázku.

```
[Name]
Inlet Profil
[Spatial Fields]
×,y,z
[Data]
[Data]
x [m], y [m], z [m], Velocity u [m s^-1], Velocity v [m s^-1], Velocity w [m s^-1]
0.00000000e+000, -1.0000000e+000, 5.0000000e-001, 0.00000000e+000, 1.77360058e+000, -2.97552515e-002
0.00000000e+000, -1.00000000e+000, 4.69999999e-001, 0.00000000e+000, 4.02262115e+000, -2.34578699e-002
9.99999978e-003, -1.00000000e+000, 4.69999999e-001, 0.00000000e+000, 7.02262020e+000, -2.34578624e-002
9.99999978e-003, -1.00000000e+000, 5.00000000e-001, 0.00000000e+000, 8.77360058e+000, -2.97551733e-002
0.0000000000e+000, -1.00000000e+000, 4.39999998e-001, 0.00000000e+000, 8.00947857e+000, -8.70745629e-003
0.0000000000e+000, -1.00000000e+000, 4.3999998e-001, 0.00000000e+000, 8.00947857e+000, -7.7745629e-003
9.99999978e-003,
0.00000000e+000,
                                -1.00000000e+000,
-1.00000000e+000,
-1.00000000e+000,
                                                                                                                                  8.00947666e+000,
8.00631285e+000,
9.00631142e+000,
                                                                                                                                                                  -8.70752148e-003
                                                                  4.39999998e-001,
                                                                                                  0
                                                                                                     .00000000e+000,
                                                                 4.09999996e-001,
                                                                                                  0.00000000e+000,
9.999999978e-003,
                                                                                                  0.00000000e+000,
                                                                                                                                                                  -5.99699444e-004
                                                                  4.09999996e-001,
                                                                  3.799999995e-001,
3.799999995e-001,
                                                                                                                                  9.00555706e+000,
9.00555754e+000,
                                                                                                                                                                  2.56108493e-003
2.56109796e-003
4.33141552e-003
0.00000000e+000,
                                  1.00000000e+000,
                                                                                                  0
                                                                                                    .00000000e+000,
                                -1.00000000e+000,
-1.00000000e+000,
                                                                                                  0.00000000e+000,
9.99999978e-003,
0.00000000e+000,
                                                                  3.499999994e-001,
                                                                                                  0.000000000e+000,
                                                                                                                                  8.00537968e+000,
                                                                                                                                  7.00537920e+000,
7.00533962e+000,
7.00533962e+000,
7.00533962e+000,
                                  1.00000000e+000,
                                                                   3.499999994e-001,
                                                                                                  0.00000000e+000,
                                                                                                                                                                  4.33136942e-003
9.99999978e-003,
                                -1.00000000e+000,
-1.00000000e+000,
                                                                                                  0.000000000e+000,
0.00000000e+000,
                                                                                                                                                                  5.40834013e-003
5.40832337e-003
0.00000000e+000,
                                                                  3.19999993e-001,
                                                                  3.199999993e-001,
9.99999978e-003,
                                                                 2.899999992e-001,
2.899999992e-001,
2.899999992e-001,
2.599999990e-001
                                -1.00000000e+000,
-1.00000000e+000,
                                                                                                                                                                  6.17251405e-003
6.17248844e-003
7.53038283e-003
0.00000000e+000,
                                                                                                  0.00000000e+000,
                                                                                                                                  8.00534487e+000,
                                                                    .899999992e-001,
.599999990e-001,
                                                                                                                                  8.00534582e+000,
8.00474405e+000,
   .999999978e-003,
                                                                                                  0.00000000e+000,
0.00000000e+000,
                                -1.00000000e+000,
                                                                                                  0.00000000e+000,
                                                                  2.599999990e-001,
2.30000004e-001,
2.30000004e-001,
9.99999978e-003,
                                -1.00000000e+000,
                                                                                                  0.00000000e+000,
                                                                                                                                  9.00474405e+000,
                                                                                                                                                                  7.53032090e-003
                                                                                                                                  9.00342989e+000,
7.00342989e+000,
0.00000000e+000,
                                 -1.00000000e+000,
                                                                                                                                                                  9.23565216e-003
9.23559815e-003
                                                                                                  0.00000000e+000,
                                -1.00000000e+000,
                                                                                                  0.00000000e+000,
9.99999978e-003,
0.00000000e+000,
                                                                 2.00000003e-001,
2.00000003e-001,
                                -1.00000000e+000,
                                                                                                  0.00000000e+000,
                                                                                                                                  4.51699856e-001,
                                                                                                                                                                  -4.76854891e-002
                                                                                                 0.00000000e+000, 1.51699305e-001,
9.99999978e-003,
                                -1.00000000e+000.
                                                                                                                                                                  -4.76858392e-002
```

Obr. 9.23 Znázornění rychlostního profilu, který je definován tabulkou.

Profil je možné definovat v *MS Excel*, ale je nutné vždy použít systémové proměnné. V našem vzorovém profilu jsou definovány souřadnice *x*, *y*, *z* a rychlosti *u*, *v*, *w*. Data lze tedy interpretovat takto.: v bodě, který je definován souřadnicemi *x*, *y*, *z* byly změřeny složky rychlosti *u*, *v*, *w*. Profil je připraven v souboru *profil_tabulka.csv*.

Pro příklad použijeme opět simulaci s turbulentním modelem *k-ɛ*. Provedeme tedy duplikaci simulace *Schod k-eps mocniny profil*. Postup při definici tabulky je tedy následující. Soubor *profil_tabulka.csv* nakopírujeme do pracovního adresáře *C:/Work/Priklad3/Priklad3*. Spustíme *CFX-Pre* a otevřeme stávající simulaci v *CFX-Pre*. Pomocí nástroje *Initialize Profile Data* (ten není možné spustit pomocí

ikony) načteme soubor s daty. Pomocí tlačítka ²² vybereme soubor *profil_tabulka.csv*. Po načtení souboru se objeví v okně výčet proměnných, které jsou součástí profilu, viz Obr. 9.24.

G2 : Schod k-eps profil tab	ulka	- CFX-Pre	11-7		Initialise Profile	Data	? X
File Edit Session Insert		s Help Command Editor Initialise Profile Data		s 🚰	Data File	C:\Work\Priklad3\profil_tabulka.csv x [m], y [m], z [m]	-
 ✓ Or Mesh ▷ Or CFX.cmdb Onnectivity ✓ Simulation ✓ Flow Analysis 1 Onalysis Type 	™≣ ≫ }∽	Macro Calculator Solve Applications Quick Setup Mode Turbo Mode))		Values Velocity u Velocity v Velocity w	Units [m s^-1] [m s^-1] [m s^-1] [m s^-1] [m s^-1]	
4 V 🗃 Fluid					ок	Apply Close	Reload

Obr. 9.24 Načtení tabulkových dat.

Načtení profilu potvrdíme tlačítkem *OK*. Nyní budeme editovat okrajovou podmínku *Inlet*. Nejprve deaktivuje vzorec tak, že vypneme definici rychlosti vzorcem pomocí ikony *Leventer a secondary secondary i nej policie a secondary seco*

Outline Bound	ary: Inlet	×	Outline Boundary:	Inlet		×
Details of Inlet in F l	luid in Flow Analysis 1		Details of Inlet in Fluid i	n Flow Analysis 1		
Basic Settings	Boundary Details Sources Plot Options		Basic Settings Bou	ndary Details Source	ces Plot Optio	ns
Boundary Type	Inlet 👻		Flow Regime			8
Location	INLET 🗸		Option	Subsonic	•	
Coord Frame	e	Ð	-Mass And Momentum	3		
-Profile Boundary	/ Conditions		Option	Cart. Vel. Componer	nts 👻	
🔽 Use Profile D	ata		U	Profil.Velocity u(x,y,	,z)	
Profile Boundary	/ Setup		v	Profil.Velocity v(x,y,	,z)	
Fronie Name			w	Profil.Velocity w(x,y	,z)	
			Turbulence			
			Option	High (Intensity = 10)%) 🔹	
、 ·	. 1		1 \ A (1 × 1	

a) interpolace profilu

b) Automatická definice složek rychlosti

Obr. 9.25 Interpolace profilu pro vstupní okrajovou podmínku Inlet.

Tím jsou data interpolována na stávající síť. Jelikož jsme v profilu definovali rychlosti *u*, *v*, *w* jsou také v okrajové podmínce automaticky definovány všechny tři složky rychlosti, viz Obr. 9.25b. Profil je možné rozšířit o teplotu, turbulentní kinetickou energii, disipaci atd. Okrajová podmínka je vždy automaticky definována podle dat, která jsou obsažena v profilu. Volbu potvrdíme *Apply* a následně ukončíme *CFX-Pre*. Resetujeme výsledky, vyřešíme úlohu a analyzujeme výsledky.



Animasi definise áleku e tekullesuán an

Animaci definice úlohy s tabulkovým profilem rychlosti na vstupu, řešením a analýzou výsledku si může uživatel zobrazit

- odkazem ANIMACE
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad3\ soubor Priklad3_Video11.exe



expresion je algebraický vzorec pro definování fyzikální veličiny.

csv je soubor pro export dat z grafu a jejich následné načtení v MS Excel.

csv je soubor pro definici okrajové podmínky tabulkou.

bod připojení je místo, kde kapalina přilne opět ke stěně.

U turbulentních modelů je nutné definovat také parametry turbulence u okrajových podmínek

? OTÁZKY Č. 9

- 1. Jak je možné duplikovat CFD simulaci v projektu?
- 2. Jak je možné definovat algebraický vzorec v CFD-Post?
- 3. K čemu je možné využít tabulku v CFD-Post?
- 4. Jaké turbulentní modely jsou standardně zobrazeny v CFX-Pre?
- 5. Jak je definován bod připojení?
- 6. Jak je definován algebraický vzorec v CFX-Pre (syntaxe příkazu)?
- 7. Jakým způsobem je nutné definovat tabulku okrajových podmínek v CFX-Pre (syntaxe tabulky)?
- 8. Čím si vysvětlujete rozdíly ve výsledcích u jednotlivých turbulentních modelů?

10 MODELOVÁNÍ ROZPTYLU PEVNÝCH ČÁSTIC 10.1VYTVOŘENÍ PROJEKTU



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vytvořit simulaci proudění se zahrnutím rozptylu pevných částic.
- definovat granulometrii pevných částic.



Popis úlohy

V této kapitole budeme modelovat rozptyl pevných částic v proudu tekutiny. Do oblasti budou z určitého bodu vstřelovány v kuželu částice sazí, které jsou pak unášeny proudem tekutiny. Rozměr sazí bude definován podle granulometrického rozboru dle *Rosin-Rammlera*. Výsledkem tedy bude zobrazení trajektorií a jejich rozptyl v řešené oblasti.



Obr. 10.1 Schematický náčrt řešené oblasti s definicí problému

Rozměry oblasti a okrajové podmínky

Délka oblasti	L = 5 m
Výška oblasti	d = 0.5 m
Výška schodu	$d_s = 0.2 \text{ m}$
Délka schodu	$L_s = 1 \mathrm{m}$
Šířka oblasti	$B = 0.6 { m m}$
Rychlost na vstupu	u = 10 m/s
Statický tlak na výstupu	0 Pa (relativně)
Proudící tekutina	Vzduch

Definice Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{v D}{v}$$

kde v je rychlost, D je charakteristický rozměr oblasti a v je kinematická viskozita Výpočet Reynoldsova čísla na vstupu

$$Re = \frac{v(d - d_s)}{v}$$
$$Re = \frac{10(0.5 - 0.2)}{15.55 \ 10^{-6}}$$
$$Re = 192926$$

Jedná se tedy o turbulentní proudění

Jednotlivé prachové částice nejsou o stejných průměrech, a podle jejich velikostí je lze rozdělit do určitých kategorií. Nejčastěji je rozdělení velikosti částic definováno pomocí *Rosin-Rammlerovy* exponenciální závislosti:

 $Y_D = \exp\left(-\left(\frac{D}{\overline{D}}\right)^n\right)$

kde D je průměr částice, Y_D je hmotnostní zlomek částic, \overline{D} - průměr zrna, při níž je hodnota nadsítného 36.8% a n je koeficient distribuce.

D Modifikace geometrie a výpočetní sítě

Nejprve si vytvoříme nový pracovní adresář *C:/Work/Priklad* (nebo jiný podle uvážení uživatele). Spustíme program *Workbench* a pomocí ikony otevřeme projekt *Priklad1.wbdb*. Následně ho pomocí ikony uložíme jako *Priklad4.wbdb* do nově vytvořeného adresáře *C:/Work/Priklad4*. Předtím, než začneme editovat jednotlivé položky projektu, resetujeme nastavení u položek setup, Solution a Results.

Spustíme program *Design Modeler* dvojklikem na položku Geometry Geometry v projektu. Po spuštění programu můžeme začít editovat jednotlivé položky tak, abychom je upravili dle zadání. Po načtení geometrie vybereme položku V Extrude1.

Jedinou položku, kterou bychom měli změnit, je tloušťka oblasti. Tloušťka byla nastavena u původní geometrie na 10mm, to ale nyní neodpovídá zadání. Vybereme položku $\sqrt{\mathbb{R}} \xrightarrow{\text{Extrudel}}$, a v okně vlastností příkazu modifikujeme FD1 *Depth* (>0) z původních 10 mm na 600 mm. Tím se označí některé položky žlutým bleskem, takže nejsou aktuální. Tlačítkem $\xrightarrow{\text{Generate}}$ aktualizujeme příkaz vysunutí.

tails View			ů.	Details view	
Details of Extrude1	2		•	- Details of Extrude.	Poderoval od
Extrude	Extrude1		11	Extrude Date Object	Extrudel
Base Object	Sketch1			Operation	Add Material
Operation	Add Material	E		Direction Vector	None (Normal)
Direction Vector	None (Normal)		=	Direction	Normal
Direction	Normal			Extent Type	Fixed
Extent Type	Fixed			EXtent type	600 mm
FD1, Depth (>0)	10 mm			As Thin/Surface?	No
As Thin/Surface?	N			Merge Topology?	Yes
Merge Topology?	Yes		*	,	

Obr. 10.2 Editace operace vysunutí

Tím je úprava geometrie ukončena, takže geometrii uložíme \square a program ukončíme *File* \rightarrow *Close Design Modeler*.

Po modifikování geometrie můžeme přistoupit k modifikaci sítě. Program *Meshing* spustíme dvojklikem na položku ^{Se Mesh}. Následně se zobrazí informace o tom, že je k dispozici

aktualizovaná geometrie. Uživateli je tedy kladena otázka, zdali se má načíst aktualizovaná geometrie viz Obr. 8.5. Tuto výzvu tedy kladně potvrdíme. Následně se spustí program *Meshing* a začne se aktualizovat geometrie oblasti.



Obr. 10.3 Potvrzení aktualizace geometrie

První úprava bude spočívat v přejmenování dvou okrajových podmínek. tato simulace bude řešena jako 3D, takže přejmenujeme okrajové podmínky *Symmetry_Left* a *Symmetry_Right* na *Left_Wall* a *Right_Wall*. Po výběru dané okrajové podmínky levým tlačítkem tlačítkem následně vyvoláme pravým tlačítkem kontextové menu a zvolíme položku *Rename*.

Abychom částečně urychlili výpočet, snížíme počet buněk (u tohoto cvičného příkladu si to můžeme dovolit). Protože nyní bude ve výpočtu figurovat také třetí rozměr, značně naroste celkový počet buněk v oblasti. Počet elementů proto u všech přímek snížíme na polovinu.



Obr. 10.4 Označení přímek při procesu síťování

Přímky č.	Počet elementů	Nastavení	Zjemnění	Velikost
	Number of Divisions	Behavior	Bias Type	Bias Factor
1, 2, 3	20	Hard		5
4,5	10	Hard		5
6	100	Hard		10
7,8	100	Hard		10
9	25	Hard		10
10	25	Hard		10

Tab. 10.1 Nastavení síťování u jednotlivých přímek

V dalším kroku budeme editovat metodu síťování pro jednotlivé objemy v položkách *Sweep Method*, *Sweep Method* 2 a *Sweep Method* 3. U všech třech položek změníme položku *Sweep Num. Divs* z původní hodnoty 1 na 0. Tím vlastně vyřadíme tuto funkci a budeme muset specifikovat počet elementů na přímce. Což se projeví v položce změnou textu z definované 0 na *Please Define*.



Obr. 10.5 Strom sítě, po úspěšném definování metody pro jednotlivé objemy

Vytvoříme tak novou položku *Edge Sizing* 7 ^{CR} Edge Sizing 7</sup>. Vybereme všechny přímky, které jsou rovnoběžné se směrem vysunutí skici. Počet elementů bude 20 a síť ještě nahustíme směrem ke stěnám. Parametry jsou uvedeny v následující tabulce. Celý postup je také graficky zobrazen na Obr. 6.27. Tímto je pouze definována metoda.

Počet elementů	Nastavení	Zjemnění	Velikost
Number of Divisions	Behavior	Bias Type	Bias Factor
20	Hard		5

📔 Project

🞯 Model (A3)

Tab. 10.2 Nastavení síťování pro přímky reprezentující šířku oblasti



Obr. 10.6 Nastavení velikosti elementů a jejich zhuštění u stěn

Tímto nastavením bude síť nahuštěna ke všem stěnám. Výpočetní síť vygenerujeme pomocí tlačítka $\frac{1}{2}$ Update . Výpočetní síť je tím aktualizována a vygenerována, program *Meshing* tedy

můžeme ukončit příkazem *File→Close Meshing*. Následně ještě uložíme celý projekt ve *Workbench* příkazem **□**.



Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad4\ soubor Priklad4_Video1.exe

Definice CFD simulace s pevnými částicemi

Pro výpočet použijeme výpočetní sít *step3D.cmdb*. Výpočetní oblast přejmenujeme ze standardního nazvu *Default Domain* na *Fluid*. První výpočet nebude zahrnovat vztlakové členy, takže na částice nebude působit gravitační zrychlení. Proudící tekutina je nestlačitelný plyn s vlastnostmi vzduchu při 25°C (*Air at 25°C*). Přestup tepla v této úloze nebudeme řešit. Zvolíme tedy v položce *Fluid Models* \rightarrow *Heat Transfer* volbu *None*. Použijeme model turbulence *k-ɛ*. Základní okrajové podmínky a nastavení jsou definovány v následujících tabulkách.

1 au. 10.5 1 auurka na	istaveni zakiaunen parametru
Turbulentní model	k-Epsilon
Přestup tepla	Bez přestupu tepla (None)
Proudící tekutina	Vzduch při 25°C (Air at 25°C)
Materiál sazí	Saze (Soot)
Granulometrie	Rosin Rammler
	$D_{36.8\%} = 0.05 \text{ mm}$
	n = 0.9
Hmotnostní průtok sazí	0.001 kg.s ⁻¹
Uhel rozptylu	45°
Rychlost částic	10 m/s

Tab. 10.3 Tabulka nastavení základních parametrů

Okrajová podmínka		Základní nastavení		Podrobné nastavení	
Insert Boundary		Basic Settings		Boundary Details	
Jméno	Oblast	Typ podmínky	Umístění		
Name ²⁾	$Domain^{1)}$	Boundary Type	Location		
				Rychlost	10 m/s
Inlot Elu	Fluid	Inlat	INI ET	Normal Speed	10 11/8
		met	Inter Inter	Int. Turbulence	10%
				Intensity	10%
Outlat	Fluid	Outlet	OUTLET	Statický tlak	0Pa
Outlet				Avr. Stat. Pressure	

Poznámka: 1) Pokud nebylo provedeno přejmenování oblasti na *Fluid*, bude zachováno standardní pojmenování *Default Domain*.

2) Jméno (*Name*) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování. Po spuštění *CFX-Pre* a načtení výpočetní sítě přejmenujeme defaultně vytvořenou doménu na *Fluid*. Tato doména obsahuje celou výpočetní oblast. Jako výchozí tekutina je automaticky\ načten vzduch s konstantními parametry při 25°C, což odpovídá zadání. Nyní v políčku *Fluid and Particle Definitions* vytvoříme pomocí ikony novou položku, jejiž jméno bude *Particle*. V položce se tak vedle položky *Fluid1* objeví další položka *Particle*. Následně je nutné zvolit materiál částic. V našem případě se jedná o saze (*Soot*), které je možné načíst ze standardního seznamu materiálů. Dále je nutné definovat tzv. morfologii částic. Zde tedy zadáme o jaký typ média se jedná, na výběr je několik definic. Dle zadání se jedná o pevné dispergované částce, proto zvolíme *Particle Transport Solid*. Granulometrii částic je možné zadat dle různých definic. Nejznámější je u nás definice dle *Rosin – Rammlera*, a proto ji také použijeme. Ostatní definice granulometrie svým způsobem definují vždy ty samé parametry, liší se pouze proměnnými, které je nutné definovat.

Fluid Details	- detailní nastavení proudících látek
Morphology	– zde se definuje morfologie látky. Na výběr jsou dvě možnosti pevné částice
	(Solid Particles) a kapalné částice - kapičky (Fluid Particles). Saze jsou
	pevná látka, proto vybereme položku Solid Particles.
Particle Diameter D	– zaškrtnutím této položky se zobrazí panel pro definici zrnitosti částic. Tuto
	položku je nutné definovat
Option	– zde volíme, jakým způsobem budeme definovat zrnitost částic. Můžeme
-	přímo definovat průměr částice nebo zvolit určité zrnitostní rozložení tak, jak
	bylo definováno jednotlivými autory. Počet proměnných se mění v závislosti
	na použité definici. My zde použijeme všeobecně známou definici dle Rosin -
	Rammlera. Definuje se zde velikost zrna při nadsítném 36.8% (Rosin
	Rammler Size) a koeficient distribuce (Rosin Rammler Power).
Particle Shape Factor	- zde je možné definovat hodnotou koeficientu, který specifikuje jak se liší
_	skutečné částice od teoreticky kulových částic použitých v definici. V tomto
	případě tuto položku nebudeme definovat.

Celý postup definice pevných částic je zobrazen viz Obr. 10.7



Obr. 10.7 Zahrnutí pevných částic v CFD simulaci

Po vytvoření a definování položky *Particle* se zvýší počet záložek v nastavení výpočtové oblasti. V těchto záložkách se definuje vazba částic k proudící tekutině, atd. V nové záložce se definuje vzájemné ovlivňování obou látek. Zde se definuje způsob vzájemného ovlivňování vzduchu a sazí viz Obr. 10.8

fic Models	Fluid Pair Models	Particle Injection Regions	i 4
-Fluid Pair			
Fluid 1	Particle		
-Fluid 1 l	Particle		
Danifiala C	Eully	Coupled	
Particle C			
- Sur	tace Tension Coettic	ient	_ <u>_</u>
-Momen	tum Iranster		
-Drag I	-orce		
Option	Sc	hiller Naumann 🛛 👻	
_ <u>_</u> L	inearisation Blend Fa	ctor	=
-Non-d	rag forces		-8-
Virtu	al Mass Force - None	2	•
Turbulent Dispersion Force - None			•
⊂Pres	sure Gradient Force	- None	⊕
-IE Par	ticle Breakup		Ð
-IE Par	ticle Collision		- ±

Obr. 10.8 Definice mezifázových sil.

Fluid Pair	- nastavení mezifázových sil
Particle Coupling	– zde se definuje, jak se budou ovlivňovat částice a proudící tekutina. Existují
	dvě možnosti. Jednosměrné ovlivnění (One-way Coupling) znamená, že
	částice budou unášeny proudem tekutiny, ale tekutina se nebude o částice
	brzdit. Obousměrné ovlivnění (Fully Coupled) znamená, že tekutina bude
	ovlivňovat trajektorie částic, a ty naopak budou brzdit tekutinu. V našem
	případě jsou částice lehké a nemají výrazný vliv na proudící vzduch, přesto
	zde zvolíme možnost (Fully Coupled)
Surface Tension Co	– zaškrtnutím této položky se zobrazí panel pro definici povrchového napětí.
	V tomto případě je tato volba irelevantní.
Momentum Transfer	– zde se definuje, jakým způsobem se bude počítat tahový součinitel. Existuje
	několik možností výpočtu dle různých autorů. Podrobněji se touto
	problematikou zabývá manuál. My zde ponecháme výpočet dle
	Schillera Neumanna, který je vhodný pro řídce rozptýlené částice.
Ostatní položky jsou pr	o tento případ nepodstatné a není nutné je definovat.
Částice je možné d	o oblasti vložit přímo rychlostním vstupem, tj. v okrajové podmínce Inlet by se
definovala položka Fl	uid Values. Částice by v tomto případě vstupovaly do oblasti rovnoměrně
vstupní okrajovou poc	lmínkou. To ale není náš případ, my máme částice do oblasti injektovat
z určitého malého body	u. Tento bod se definuje v záložce Particle Injection Regions. Zde je možné
definovat bod (několik	k bodů) a všechny parametry nezbytné pro definování toku částic. Jedná se
jmenovitě o položky:	
Injection Method	- zde se definuje, jakým způsobem se budou rozprašovat částice, dle zadání
	kužel
Injection Centre	 zde se definují souřadnice bodu, ze kterého budou částice vylétávat
Injection Vel. Mag.	- zde je nutné definovat rychlost, jakou budou částice do oblasti vstupovat
	skrze bod, dle zadání 10 m/s.
Cone Definition	 zde upřesníme typ kuželu a uhel rozprašování. Dle zadání je úhel 45°.
Injection Direction	 zde se definuje směrový vektor rozstřiku
Number of Positions	- zde se definuje počet částic, které se budou účastnit výpočtu. Tento počet
	částic bude maximálně možné zobrazit ve výsledcích. V našem případě
	postačí 200 částic.
Particle Diameter Dis – zde je možné znovu definovat rozměr částic, po definování této položky se přepíše nastavení, které jsme definovali v položce *Particle*. Proto tuto volbu nebudeme definovat

Particle Mass Flow R – zde se definuje hmotnostní tok částic. Jelikož nejsou částice kontinuitní médium, je nutné specifikovat jak rychlost tak i hmotnostní tok. Dle zadání 0.001 kg/s.

Postup definice je zobrazen viz Obr. 10.9. Po definování všech parametrů potvrdíme volbu OK.



Obr. 10.9 Definice zdrojového bodu pro částice

Okrajové podmínky pro vstup a výstup definujeme již poněkolikáté opakovaným postupem podle tabulky zadání.

Pokud jsou ve výpočtu zahrnuty částice, je nutné na stěně definovat koeficienty popisující chování částice při kontaktu s pevnou stěnou, tedy editovat okrajovou podmínku *Fluid Default*, která popisuje všechny pevné stěny. V záložce *Fluid Values* se definují koeficienty popisující chování částice na stěně, viz Obr. 10.10

~	Boundary Details	Fluid Values	Sources 4
Boundary Condition	ons		Ξ
Particle			
Particle			
-Wall Interaction	۱ <u> </u>		
Option	Equation	Dependent	•
Velocity			8
0-1-	Restitutio	on Coefficient	•
Option			
Option Perpendicular Co	oeff. 0.9		
Option Perpendicular Co Parallel Coeff.	0.9		
Perpendicular Co Parallel Coeff.	oeff. 0.9 0.9 mpact Angle		

Obr. 10.10 Definování koeficientů definujících odraz částice od stěny

Fluid Values (Vlastnosti Tekutiny)

Perpendicular Coeff. – tento koeficient definuje poměr složky rychlosti částice kolmé ke stěně po a před kontaktem se stěnou.

Paralel Coeff.

 tento koeficient definuje poměr složky rychlosti částice rovnoběžné se stěnou po a před kontaktem se stěnou.

Oba koeficienty mají v našem případě hodnotu 0.9. Tyto koeficienty závisí na materiálu částice a stěny. Pokud je hodnota obou koeficientů rovna 1, jde o ideálně plastický odraz. Pokud je hodnota obou koeficientů 0, částice na stěně ulpí (např. částice mlhy se při kontaktu se stěnou neodrazí, ale ulpí na ní)

Pro vysvětlení je na dalším obrázku uveden příklad pro hodnotu koeficientů 0.5 a 0.75.

Perpendicular Coeff. = 0.5;
$$\frac{4.6}{9.2}$$
 = 0.5; Koeficient kolmého odrazu částice
Parallel Coeff. = 0.75; $\frac{9.6}{12.8}$ = 0.75; Koeficient podélného odrazu částice
9.2 m.s⁻¹
 9.2 m.s^{-1}
 12.8 m.s^{-1}
Obr. 10.11 Grafické znázornění obou koeficientů definovaných na stěně

Nastavení parametrů řešiče

10 s.

Úlohu standardně inicializujeme, stejně jako v předchozí kapitole. Aby byly částice v simulaci zahrnuty, je ještě nutné definovat specielní nastavení pro samostatný řešič částic. Toto nastavení provedeme editací nastavení řešiče pomocí ikony 🖄, anebo dvojklikem na položku nastavení řešiče 📩 Solver Control ve stromu simulace. V položce Basic Settings změníme pouze počet iterací na 1000 a ostatní volby ponecháme. Následně se přepneme do záložky Particle Control, viz Obr. 10.12, a budeme definovat nastavení řešiče pro částice. Budeme pouze zaškrtávat jednotlivé položky a ponecháme jejich standardní číselné nastavení. Particle Control (Nastavení řešiče pro částice) First Iteration for ... - tento koeficient definuje iteraci, ve které budou částice poprvé zahrnuty do výpočtu. Standardně je 10. Iteration Frequency. - tento koeficient definuje, jak často se bude výpočet dráhy aktualizovat. Standardně je 5. Particle Under Rel...- tento koeficient definuje relaxační parametry pro řešení rychlosti částic. Number of Integrat...- tento koeficient definuje maximální počet integračních kroků v každém elementu, kterým částice projde. Standardně je 10. Max. Particle. Intg... – definuje maximální počet časových kroků integrace. Standardně je $1*10^{10}$ s. Max. Tracking Time- tento koeficient definuje, jak dlouho částice setrvává ve výpočtové oblasti. Částice, které v oblasti setrvají delší čas, jsou z výpočtu vyřazeny. Tento koeficient závisí na velikosti dané oblasti. V našem případě postačuje hodnota

- Max. Tracking Dis...– tento koeficient definuje maximální dráhu každé trajektorie. Veličina je závislá pouze na velikosti oblasti. Standardně je natavena na 10 m.
- Max. Num. Integr... tento koeficient definuje maximální počet integračních kroků každé trajektorie. Veličina je závislá na jemnosti sítě a velikosti oblasti. Standardně je natavena na 10 000

Outline	Solve	r Control]			×
etails of Sol	ver C	ontrol in	Flow Analysis 1			
Basic Setti	ngs	Equation	n Class Settings	Particle C	ontrol	4
-Particle C	ouplin	g Control			Ξ	
-IV Firs	t Itera	tion for Pa	article Calculation		Ξ	
First Iter	ation		10			
: 🔽 Iter	ation F	Frequency			-8-	
Iteration	n Frequ	Jency	5			
	ticle So	ource Cha	nge Target		Ð	
- Partic	de Uno	ler Relaxa	tion Factors		Ð	
-Particle Ir	ntegra	tion			Ξ	
_I▼ Nun	→ IV Number of Integration Steps per Element					≡
Value	Value 10					
-IV Max	Max. Particle Intg. Time Step					
Value			1.0E10 [s]			
- Che	emistry	Time Step	Multiplier			
- V Partic	de Ter	mination C	ontrol		Ξ	43
-IV Max	Maximum Tracking Time			-8-		
Value			10 [s]			
Maximum Tracking Distance			-8			
Value 10 [m]						
Wax. Num. Integration Steps					-8	
Value			10000			-
			-			

Obr. 10.12 Nastavení parametrů řešiče pro částice

Poslední tři koeficienty omezují trajektorie částic. Pokud by se částice dostala do víru a její dráha se dostala do nekonečné smyčky, probíhal by výpočet teoreticky do nekonečna. Koeficienty tak problematické trajektorie z výpočtu odstraňují.

Nastavením řešiče potvrdíme Apply a Close, anebo OK. Program CFX-Pre ukončíme a spustíme automatické řešení ve Workbench prostřednictvím tlačítka ⁷ Update Project</sup>. Následně úlohu iteračně vyřešíme. Během řešení se zobrazuje další okénko s residuály částic, které reprezentuje míru konvergence trajektorií.

ANIMACE

Animaci kompletního procesu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad4\ soubor Priklad4_Video2.exe

10.2ANALÝZA VÝSLEDKŮ



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• analyzovat trajektorie částic v postprocesoru.



VÝKLAD

Po ukončení výpočtu načteme výsledky do postprocesoru. Výsledky budeme vyhodnocovat obdobným způsobem jako u předchozích příkladů. Zobrazíme si střední rychlost, statický tlak a turbulentní kinetickou energii. Definujeme si vyhodnocovací rovinu (XY, Z = 0.3) a na ní pole rychlosti tlaku a turbulentní kinetické energie. Ve stromu postprocesoru se objevila nová položka (*Res PT for Particle*), která signalizuje přítomnost trajektorií částic ve výsledkovém souboru.



Obr. 10.13 Indikace trajektorií částic ve výsledkovém souboru

Zaškrtnutím tohoto políčka se standardně zobrazí 10 trajektorií. Barva trajektorií je světle šedá. Pokud chceme trajektorie obarvit nějakou veličinou, můžeme upravit tuto položku, anebo vytvořit nové zobrazení. Trajektorie definujeme stejně jako konturovaná pole s tím rozdílem, že není obarvována plocha, ale obarvují se trajektorie částic.

Nové trajektorie si vytvoříme kliknutím na ikonu 🛸. Položku pojmenujeme a přistoupíme k definici, viz Obr. 10.14.

Details of Particle Track 1					Details of Part	ticle Trac	k 1							
Geometry	Colour	Symbol	Render	View	Info		Geometry	Colour	Symbol	Render	View	Info	_	
Method	From R	es			•		Mode	Variable	r.)
Domains	All Dom	ains			¥		Variable	Partid	e.Mean Part	tide Diamete	r			
Material	Particle	5î			*		10.000	Land			-		-	
Reduction Type	Maximu	im Number o	f Tracks		-		Kange	Local					*	
Max Tracks	25				¢		Min Max				0.0	5e-06	[m]	
Limits Option	Up To	Current Time	estep		•		Boundary Da	ta	O Hybr	id	@ c	onservati	ve	
Filter						-	Colour Scale	Linear	ŝ.				•	
						1.	Colour Map	Defau	lt Colour Ma	φ			•	R
							Undef. Colour							

Obr. 10.14 Definováni trajektorií částic v postprocesoru

Geometry (Hlavní nastavení)

Max Tracks ... – toto je jediný relevantní parametr, který je vhodné měnit. Jedná se o maximální zobrazovaný počet trajektorií. Toto číslo může maximálně nabývat hodnoty, kterou jsme definovali v simulaci. V našem případě je definováno 200 částic, viz Obr. 10.9, proto zde nemá význam definovat číslo větší než 200.

Colour (Barva částic)

Mode – zde definujeme, jak se mají trajektorie částic obarvit. Existují dvě možnosti: *Constant* - jedna barva definovaná uživatelem, *Variable* - obarvení trajektorie veličinou. Zvolíme tedy položku *Variable*.

zde definujeme veličinu, kterou se mají částice obarvit. Pokud není veličina v základním seznamu po rozkliknutí nabídky tlačítkem , je nutné zobrazit plné

menu pomocí tlačítka . V tomto seznamu jsou všechny veličiny, které je možné z výpočtu vyhodnotit. My si částice obarvíme jejich průměrem. Z rozšířeného menu tedy zvolíme položku Střední průměr částic sazí (*Particle Mean Particle Diameter*).

Ostatní položky- stejné jako u vektorů a kontur, viz např. vysvětlení pro Obr. 6.57.

Obrázek

Variable

Obr. 10.15 ilustruje námi vytvořené trajektorie částic. Je zde patrné, že nejvíce se v poli vyskytují částice obarvené zelenou barvou, tedy průměr ca 0.067 mm. Minimálně se vyskytují částice obarvené modrou a červenou, tedy min a max. průměr. Tím je tedy doložena definice granulometrie dle *Rosin - Rammlera*. Současně je také v pravé části zobrazen detail v okolí bodu. Je zde vidět, jak se částice rovnoměrně rozptylují v úhlu 45°, a jsou strženy proudem okolní tekutiny a unášeny po proudu. Jelikož není ve výpočtu zahrnuta gravitace, není zde zřetelný pokles těžkých částic (velký průměr) a naopak setrvání lehkých částic (malý průměr) v proudu tekutiny.





K ANIMACE

Animaci analýzy výsledků si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad4\ soubor Priklad4_Video3.exe

10.3DEFINICE CFD SIMULACE S PEVNÝMI ČÁSTICEMI SE ZAHRNUTÍM GRAVITACE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• zahrnou do výpočtu vliv gravitace.



VÝKLAD

Abychom byli schopni porovnat vliv gravitace na trajektorie pevných částic unášených vzduchem, provedeme další simulaci, která bude zahrnovat také vztlakové členy. Z první simulace vyexportujeme soubor *.ccl. Dále vytvoříme novou simulaci, nasdílíme síť a novou simulaci definujeme pomocí souboru *.ccl. V doméně fluid v záložce *Bacis Stettings* definujeme vektor tíhového zrychlení g = (0,-9.81,0) m/s² a referenční hustotu $\rho_{ref} = 1.185$ kg/m³, viz Obr. 10.16. Tímto nastavením nebude ovlivněna tekutina, ale pouze částice. V záložce *Fluid Specific Models* ještě dále upřesníme nastavení. Pro položku *Fluid 1*, což je vzduch, upravíme položku *Fluid Buoyancy Model* na *Non Buoyant*. Tím vyřadíme vztlakové členy v rovnici proudění. U položky Particle, což jsou saze, upravíme položku *Fluid Buoyancy Model* na *Density Diference*.

Basic Settings	Fluid M	odels	Fluid Specific Models	Flui	+
Material Morphology		Ar at	25 ·		G
Option	m Volume	Cont	tinuous Fluid 👻 n B	Đ	
Domain Models					
Pressure				Θ	
Reference Pres	sure	1 [atm	1		
Buoyancy				Β	
Option		Buoyar	nt 👻		
Gravity X Dirn.		0 [m s	^-2]		
Gravity Y Dirn.		-9.81	[m s^-2]		
Gravity Z Dirn.		0 (m s	^-2]		
Buoy. Ref. Den	sity	1.185	[kg m^-3]		1
Ref. Location					
Option		Autor	matic 👻		
Domain Motion				8	
Option		Station	nary 👻		
Mesh Deforma	tion			8	
Option		None			H

Obr. 10.16 Definice tíhového zrychlení.

Particle- Saze	Fluid 1- Vzduch
Outline Domain: Fluid	🛛 Outline Domain: Fluid
Details of Fluid in Flow Analysis 1	Details of Fluid in Flow Analysis 1
3 Fluid Models Fluid Specific Models Fluid Pair Models	Image: Specific Models Fluid Models Fluid Specific Models Fluid Pair Models Image: Specific Models
Fluid	- E - Fluid
Fluid 1	Fluid 1
Partide	Partide
Partide	Fluid 1
Erosion Model E	E Fluid Buoyancy Model
Option None 🗸	Option Non Buoyant 👻
Fluid Buoyancy Model	
Option Density Difference 🗸	

Obr. 10.17 Definice tíhového zrychlení u jednotlivých položek.

Obr. 10.18 ilustruje námi vytvořené trajektorie částic se zahrnutím gravitačního působení na částice. Je zde patrný pokles těžkých částic k dolní stěně a naopak setrvání lehkých částic v proudu vzduchu.

Particle.Mean Particle Diar Particle Track 1 2.630e-004	meter	NSYS [®]
1.985e-004		
1.340e-004		
6.951e-005		
5.000e-006		

Obr. 10.18 Zobrazení trajektorií částic se zahrnutím gravitace.



ANIMACE

Animaci kompletního procesu tvorby simulace s gravitací si může student zobrazit

- odkazem ANIMACE
- spustit ručně z adresáře Animace/Priklad4/ soubor Priklad4_Video4.exe



Granulometrie definuje rozměr a zrnitost pevných částic.

Drag koeficient je koeficient odporu mezi kontinuitním médiem a dispergovanými částicemi. Paralelní a Kolmý koeficient definuje parametry odrazu částic od pevné stěny. Počet částic definuje maximální počet částic v simulaci.

Coupling je vazba částic a tekutiny

Limitace trajektore částice je limitace, která zamezuje zacyklení trajektori během výpočtu.



OTÁZKY Č. 10

- 1. Jak je možné do simulace zahrnout rozptyl částic?
- Jaké parametry je nutné definovat při popisu granulometrie částic? 2.
- 3. Jaké dva druhy vazby částice a tekutiny (Coupling) známe?
- 4. Proč je nutné definovat tahový koeficient u částic?
- 5. V jakém rozmezí je možné definovat paralelní a kolmý koeficient na pevných stěnách?
- 6. Jaké dva extrémní případy dopadu-odrazu částic známe, a jaké hodnoty paralelního a kolmého koeficientů tomu odpovídají?
- 7. Jaké základní parametry je nutné definovat v řešiči trajektorie (limitace atd.)?
- 8. Jakým způsobem ovlivňuje gravitace trajektorie částic?
- 9. Které základní síly mohou působit na částice?

11 MODELOVÁNÍ ROZPTYLU PEVNÝCH ČÁSTIC 11.1MODIFIKACE PROJEKTU A DEFINICE SIMULACE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vytvořit simulaci proudění se zahrnutím rozptylu znečišťující látky.
- definovat dodatkovou veličinu.
- specifikovat kinematickou difuzivitu.



Popis úlohy

V této kapitole budeme modelovat rozptyl znečišťující látky v proudu tekutiny. Ve výpočtové oblasti bude v daném bodě generováno určité množství znečišťující plynné látky a ve výsledku budeme sledovat rozptýlení této látky po proudu. Předpokládáme, že hmotnostní zlomek příměsi je relativně malý a zanedbatelně ovlivňuje fyzikální vlastnosti proudící tekutiny např. kouř vycházející z cigarety).



Obr. 11.1 Schematický náčrt řešené oblasti s definicí problému

Rozměry oblasti a okrajové podmínky

J 1 J	
Délka oblasti	L = 5 m
Výška oblasti	d = 0.5 m
Výška schodu	$d_s = 0.2 \text{ m}$
Délka schodu	$L_s = 1 \mathrm{m}$
Rychlost na vstupu	v = 10 m/s
Statický tlak na výstupu	0 Pa (relativně)
Proudící tekutina	Vzduch
Znečišť ující látka	Kouř

Výpočet Reynoldsova čísla na vstupu

$$Re = \frac{v(d - d_s)}{\upsilon}$$

$$Re = \frac{10(0.5 - 0.2)}{15.55 \ 10^{-6}}$$

$$Re = 192926$$
Jedná se tedy o turbulentní proudění

Definice CFD simulace

Stejně jako v předchozím případě vytvoříme nový pracovní adresář *C:/Work/Priklad5* (nebo jiný podle uvážení uživatele). Spustíme program *Workbench* a pomocí ikony otevřeme projekt *Priklad1.wbdb*. Následně ho pomocí ikony uložíme jako *Priklad5.wbdb* do nově vytvořeného adresáře *C:/Work/Priklad5*. Tím jsme vytvořili kopii, kterou je možné editovat, aniž by byl změněn původní projekt. Před tím, než začneme editovat položku setup provedeme reset u položky solution. Tím je smazáno pouze řešení úlohy, takže zůstane zachován vyhodnocovací soubor. Základní okrajové podmínky a nastavení jsou definovány v následujících tabulkách. Simulace je defacto zcela nastavena, stačí pouze změnit turbulentní model z původního nastavení *None-Laminar* na *k-ɛ*. A upravíme okrajové podmínky pro vstup (*Inlet*) a výstup (*Outlet*) dle následující tabulky.

Turbulentní model	k- $arepsilon$			
Přestup tepla	Bez přestupu tepla (None)			
Proudící tekutina	Vzduchu při 25°C (Air at 25°C)			
Kouř	Smoke			
Kinematická difuzivita	$1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$			
Hmotnostní tok kouře	$1 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$			

Tab. 11.1	Tabulka na	astavení	základních	parametrů
-----------	------------	----------	------------	-----------

Okrajová podmínka Zákl		idní nastavení	Podrobné nastavení				
Insert Bo	oundary	Ba	Basic Settings Bo		uls		
Jméno	Oblast	Typ podmínky	Umístění				
Name ²⁾	Domain ¹⁾	Boundary Type	Location				
Symmetry Left	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_LEFT		$\left \right\rangle$		
Symmetry Right	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_RIGHT		\ge		
				Rychlost Normal Speed	10 m/s		
				Int. Turbulence	0.05		
Inlat	Ebrid	Inlat	INIL ET	Intensity	(5%)		
Innet	Fluid	iniet	INLEI	Délkové měřítko	0.2 m		
				Eddy Len. Scale	0.5 m		
				Hm. zlomek kouře	$0 \ln \alpha/m^3$		
				Additional Variable	0 kg/m		
Outlet	Fluid	Outlet	OUTI FT	Statický tlak	0Pa		
Outlet	i iulu	Outlet	OUTEET	Avr. Stat. Pressure	01 a		

Tab. 11.2 Tabulka okrajových podmínek

Poznámka: 1) Pokud nebylo provedeno přejmenování oblasti na *Fluid*, bude zachováno standardní pojmenování *Default Domain*.

2) Jméno (Name) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování.

Znečišťující látku, která neovlivňuje fyzikální vlastnosti proudící látky, je možné definovat jako dodatkovou proměnnou (*Additional Variable*) pomocí ikony **X**. Látku pojmenujeme kouř (*Smoke*) a definujeme ji jako objemovou veličinu (*Volumetric*), viz Obr. 11.2.

🕑 Ins	ert Additional V 💡 🗾 🔀	
Name	Smoke	
	Cancel	

Outline	Additional Variable: Smoke	×
Details of Sr	moke	
Basic Set	tings	
Variable Ty	Volumetric	•
Units	[kg m^-3]	
Tensor Typ	pe Scalar	•

Obr. 11.2 Definování dodatkové proměnné, Kouře

Basic Settings (zákl	adní nastavení)
Variable Type	– zde se definuje typ veličiny jako veličina specifikovaná (Specific),
	nespecifikovaná (Unspecified) a objemová (Volumetric). V našem případě se
	jedná o veličinu objemovou.
Units	– zde napíšeme do hranatých závorek fyzikální jednotku, kterou je nutné
	definovat pomocí základních jednotek, tedy [kg m^-3]
Tensor Type	- zde definujeme o jakou veličinu se jedná, zda je to skalár (Scalar) nebo
	vektor (Vector). V našem případě jde o skalár, objemová koncentrace nemá
	směr.

Po nastavení se definice proměnné potvrdí *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Následně by se měla ve stromu objevit dodatková proměnná *Smoke*. Současně s tím je také ve výpočtové oblasti definovaná nová objemová veličina a je nutné definovat její kinematickou difuzivitu.

Outline Doma	in: Fluid			×
Details of Fluid in I	low Analysis 1			
Basic Settings	Fluid Models Ir	nitialisation		
Heat Transfer				-
Option	None		•	
Turbulence				
Option	k-Epsilon		•	
Wall Function	Scalable		-	
-Advanced Tur	bulence Control			
Combustion				
Option	None			
Thermal Radiat	on			
Option	None		•	=
- Additional Varia	ble Models		Ξ	
- Additional Var	able			
Smoke				
⊂ 🔽 Smoke	—			
Option	Transpor	t Equation 👻	_	
- 📝 Kinema	tic Diffusivity			
Kinematic D	iffusivity 1e-5 [n	n^2 s^-1]		-

Obr. 11.3 Definování koncentrace kouře na vstupu

Additional Variable Details (detaily dodatkových veličin)

Additional Varia	- v tomto okně se zobrazí seznam všech dodatkových proměnných. V našem
	případě se jedná pouze o kouř (Smoke).
Option	- zde volíme, jakým způsobem se bude kouř mísit s okolním vzduchem.
	Zvolíme zde možnost Transport Equation.
Kin. Diffusivity	– zde definujeme kinematickou difuzivitu kouře. Dle zadání je $0.00001 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$.

Definováním dodatkové proměnné je o tuto veličinu také rozšířena vstupní okrajová podmínka *Inlet*. Vedle základních parametrů jako je rychlost a intenzita turbulence musíme ještě definovat objemovou koncentraci kouře na vstupu. Ta je v našem případě rovna 0 kg.m⁻³, viz Obr. 11.4.

Basic Settings	Boundary Details	Sources	Plot Optio	ns
Flow Regime				Ξ
Option	Subsonic		•	
Mass And Mome	entum			Ξ
Option	Normal Spe	ed	•	
Normal Speed	10 [m s^-1]		
Turbulence				Ξ
Option	Intensity a	nd Length Sca	le 🔻	
Fractional Inten	sity 0.05			
Eddy Length Sca	ale 0.3 [m]			
Additional Varia	bles			Ξ
Smoke				
Smoke				

Obr. 11.4 Definování koncentrace kouře na vstupu

Stejně jako u vstupu je také podmínka stěny *Fluid Default* doplněna o definici kouře. Tím je možné simulovat vývin látky na pevné stěně. My takový případ neřešíme, takže tok stěnou bude roven 0 kg m⁻² s⁻¹, čemuž odpovídá volba *Zero Flux*, viz Obr. 11.5.

Outline Boun	dary: Fluid Default	×
etails of Fluid De	fault in Fluid in Flow Analysis 1	
Basic Settings	Boundary Details Sources	
-Mass And Mom	entum	
Option	No Slip Wall	•
- Wall Veloc	ity	
-Wall Roughnes	3	
Option	Smooth Wall	•
Additional Varia	bles	
Smoke		
Caraka		
Smoke	F	
Option	Zero Flux	•

Obr. 11.5 Definování koncentrace kouře na stěnách

Dle zadání se má kouř vyvíjet v geometricky zanedbatelně malém bodě, proto tedy využijeme k definici zdroje kouře zdrojový bod. Ten vytvoříme pomocí ikony 🗐. Zdrojový bod libovolně pojmenujeme (např. standardní název *Source Point 1*). Zdrojový bod se definuje obdobně jako zdroj částic v předchozím příkladě. Je nutné zadat tři souřadnice X, Y, Z a hmotnostní tok kouře, který je v bodě vyvíjen, viz Obr. 11.6. Dle zadání Obr. 11.1 a zvoleného souřadného systému sítě je bod

geometricky definován souřadnicemi (-0.9, 0.35, 0.005). Ve zdrojovém bodě je možné definovat zdroj základních počítaných veličin, ty jsou závislé na volbě turbulentního modelu. V našem případě se definuje zdroj kouře, proto tedy zvolíme *Smoke* v okně *Sources*. Zaškrtneme položku *Smoke* a definujeme hmotnostní tok vyvíjeného kouře 1×10^{-5} kg/s. Po potvrzení zdrojového bodu je v grafickém okně zdrojový bod zobrazen prostřednictvím červené kulové plochy, takže je možné zkontrolovat geometrické umístění zdrojového bodu.



Obr. 11.6 Definování zdrojového bodu

□ Inicializace a nastavení řešiče

Úlohu standardně inicializujeme, viz Obr. 11.7. Toto nastavení provedeme editací nastavení řešiče pomocí ikony nebo dvojklikem na položku nastavení řešiče Solver Control ve stromu simulace. V položce *Basic Settings* změníme pouze počet iterací na 300 a ostatní volby ponecháme. Pokud je použit turbulentní model a dodatková proměnná, je nutné do inicializace zahrnout kromě turbulentních veličin také kouř *Smoke*. Tuto položku je možné ponechat v nastavení *Automatic*. Volbu potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Následně úlohu uložíme, ukončíme *CFX-Pre* a spustíme řešení.

Outline Solver Contro	ol	×	Outline Initialisatio	n		×
Details of Solver Control	in Flow Analysis 1		Details of Global Initia	lisation in Flow Analysis 1		
Basic Settings Equa	tion Class Settings Advanced Op	tions	Global Settings		1-1	
Advection Scheme			Velocity Type	Cartesian		^
Option	High Resolution 👻	•	- Cartesian Velocity (
Turbulence Numerics			Ontion	Automatic with Value		
Option	First Order 🗸		U	5 [m s^-1]		
Convergence Control			v	0 [m s^-1]		
Min. Iterations	300		w	0 [m s^-1]		
-Fluid Timescale Contro	bl		Static Pressure			
Timescale Control	Auto Timescale 🔹		Option	Automatic with Value 👻		
Length Scale Option	Conservative 👻		Relative Pressure	0 [Pa]		Ξ
Timescale Factor	1.0		Turbulence			
	ale	-±	Option	Medium Intensity and Edr 👻		
- Convergence Criteria			Additional Variable	Details		
Residual Type	RMS -		Smoke			
Residual Target	1.E-4					
Conservation Tar	get					
Elapsed Wall Clock	Time Control		Smoke			
Interrupt Control			Option	Automatic 👻		
						-

Obr. 11.7 Zobrazení inicializace a nastavení řešiče



Animaci kompletního procesu tvorby simulace s dodatkovou proměnnou si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad5\ soubor Priklad5_Video1.exe

11.2ANALÝZA VÝSLEDKŮ



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• vytvořit graf s několika řadami.



VÝKLAD

Po ukončení výpočtu spustíme postprocesor a zobrazíme si střední rychlost, statický tlak a turbulentní kinetickou energii. Jelikož nebyla resetována položka ^{S Results}, zůstal tak zachován vyhodnocovací soubor, a není nutné definovat vyhodnocovací rovinu a přímky. Pro přehlednost ale budou uvedeny veškerá nastavení. Veškeré konturované obrázky vytvoříme na vyhodnocovací rovině *Plane 1* (XY, Z = 0.005)

Velocity Contour 1	
1.023e+001	
9.208e+000	Noncommercial use only
8.185e+000	
7.162e+000	
6.139e+000	
5.115e+000	
4.092e+000	
3.069e+000	
2.046e+000	
1.023e+000	
0.000e+000 [m s^-1]	

Obr. 11.8 Zobrazení střední rychlosti



Obr. 11.9 Zobrazení statického tlaku

Turbulence Kinetic Energy Contour 3	
5.397e+000	
4.858e+000	Noncommercial use only
4.319e+000	
- 3.780e+000	
3.241e+000	
2.703e+000	
2.164e+000	
1.625e+000	
1.086e+000	
5.469e-001	
7.992e-003	
[m^2 s^-2]	

Obr. 11.10 Zobrazení turbulentní kinetické energie

Sm Cor	oke itour 4	
	2.400e-003	
	2.160e-003	Noncommercial use only
	1.920e-003	
	1.680e-003	
	1.440e-003	
	1.200e-003	
	9.600e-004	
	7.200e-004	
	4.800e-004	
	2.400e-004	
	0.000e+000	
[kg	m^-3]	

Obr. 11.11 Zobrazení objemové koncentrace kouře

Dále si vytvoříme nový graf a v něm vyobrazíme na třech přímkách koncentraci kouře. Postup pro vytvoření grafu se třemi řadami je podrobně popsán na Obr. 6.70. V následující tabulce jsou souřadnice bodů a pojmenování jednotlivých přímek. Tyto přímky by měly již být definovány, proto je není nutné definovat

				2			
Jméno	Bod 1			Bod 2			Počet
	Point 1			Point 2			vzorků
Name	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Samples
Line 2	0.5	0	0.005	0.5	0.5	0.005	25
Line 3	2	0	0.005	2	0.5	0.005	25
Line 4	3.5	0	0.005	3.5	0.5	0.005	25

Tab. 11.3 Tabulka pro definici vyhodnocovacích přímek 2-4



Obr. 11.12 Zobrazení koncentrace ve třech přímkách

Z grafu je zřejmý rozptyl kouře po proudu. Maximální hodnota koncentrace se vzdálenosti od zdroje snižuje a vzniklá směs se postupně homogenizuje.

ANIMACE

Animaci procesu řešení simulace a analýzy výsledků simulace s dodatkovou proměnnou si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad5\ soubor Priklad5_Video2.exe

SHRNUTÍ POJMŮ Č. 11

Dodatková proměnná umožňuje definovat vlastní veličinu.

Kinematická difuzivita je fyzikální veličina, které popisuje difuzní koeficient dané látky.

OTÁZKY Č. 11

- 1. Jak je možné do simulace zahrnout rozptyl látky, která neovlivňuje fyzikální vlastnosti proudící tekutiny?
- 2. Jakou veličinu je nutné specifikovat u objemové jednotky?
- 3. Co je to kinematická difuzivita, a jakou má jednotku?
- 4. Ovlivní turbulentní parametry na vstupu rozptyl kouře?
- 5. Má smysl do výpočtu zahrnout gravitaci, zdůvodněte odpověď?

12 MODELOVÁNÍ PŘESTUPU TEPLA A VEDENÍ TEPLA V PEVNÉ STĚNĚ

12.1DEFINICE PROJEKTU



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vytvořit geometrii obsahující dva nezávislé objemy.
- definovat parametry sítě pro jednotlivé objemy samostatně.
- definovat automaticky metodu sweep pro vhodné objemy.



Popis úlohy

V této kapitole se budeme zabývat modelováním přestupu a vedením tepla v pevné stěně. Výpočetní oblast je rozšířena o pevnou stěnu. Na vnější stěně je teplota 1000°C a v důsledku vedení tepla přes pevnou stěnu je vnitřní stěna (ta která sousedí se vzduchem) ochlazována, respektive proudící vzduch ohříván. Pro výpočet použijeme turbulentní model k- ϵ .



12.1 Schematický náčrt řešené oblasti s definicí problému

Obr.

Rozměry oblasti a okrajové podmínky

ove poeminy	
Délka oblasti	L = 5 m
Výška oblasti	$D = 1 \mathrm{m}$
Výška oblasti se vzduchem	d = 0.5 m
Výška schodu	$d_s = 0.2 \text{ m}$
Délka schodu	$L_s = 1 \mathrm{m}$
Rychlost na vstupu	v = 10 m/s
Teplota na vstupu	$t = 20^{\circ}\mathrm{C}$
Statický tlak na výstupu	0 Pa (relativně)
Proudící tekutina	Vzduch
	$\lambda = 1.2 \text{ W/(m.K)}$
Izolace	$c_p = 500 \text{ J/(kg.K)}$
	$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$

Definice Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{v D}{v}$$

kde v je rychlost, D je charakteristický rozměr oblasti a v je kinematická viskozita Výpočet Reynoldsova čísla na vstupu

$$Re = \frac{v(d - d_s)}{v}$$
$$Re = \frac{10(0.5 - 0.2)}{15.55 \ 10^{-6}}$$
$$Re = 192926$$

Jedná se tedy o turbulentní proudění.

Vytvoření geometrie

V tomto příkladě budeme definovat zcela nový projekt. Vytvoříme nový pracovní adresář *C:/Work/Priklad6* (nebo jiný podle uvážení uživatele). Spustíme program *Workbench* a pomocí ikony uložíme nepojmenovaný projekt jako *Priklad6.wbdb* do nově vytvořeného adresáře *C:/Work/Priklad6*. Tím jsme vytvořili prázdný projekt. V projektu vložíme CFD simulaci Fluid Flow(CFX), a pojmenujeme jej *Schod s pevnou stěnou*.

Geometrii vytvoříme obdobným způsobem jako u prvního příkladu. Se znalostmi z prvního příkladu by měl být student schopen vytvořit geometrii samostatně, proto uvedeme pouze stručný popis jednotlivých kroků. Celkem vytvoříme tři skicy. První skica bude obsahovat obdélník 5000x1000mm, jehož jeden roh bude v počátku souřadného systému roviny XY, tento obdélník reprezentuje celou oblast. Tuto skicu následně vysuneme s tloušťkou 10mm a v příkazu ještě změníme typ vysunutí na *Add Frozen*. Tím nám vznikne objem 5000x1000x10, který je připraven pro dělení na podobjemy (kvůli tvorbě sítě). Pomocí druhé skicy rozdělíme tuto oblast na dva objemy tak, aby jeden objem reprezentoval tekutinu a druhý pevnou látku. Tyto dva vzniklé objemy následně přejmenujeme na *Fluid* a *Solid*. Pomocí třetí skicy rozdělíme objemy na skupinu objemů. Nyní je tedy v oblasti celkem 6 objemů, přičemž tři náleží pevné látce a tři tekutině. Tyto objemy zformujeme do dvou partů, které opět přejmenujeme na *Fluid* a *Solid*. Dělení objemů je prováděno příkazem *Extrude* s nastavení *Slice Material* a vysunutí je provedeno pomocí tenké stěny *As Thin/Surface* s nulovými mezemi.





Obr. 12.2 Schematické označení jednotlivých skic

Obr. 12.3 Postup při vytvoření základního objemu



Modelování přestupu tepla a vedení tepla v pevné stěně

Obr. 12.4 Postup při dělení objemu na pevnou látku a tekutinu

Po této operaci je vhodné přejmenovat dva vzniklé objemy na Fluid a Solid. při další operaci dělení se toto pojmenování zachová, takže ve výsledku bude model obsahovat tři objemy pojmenované Fluid a tri objemy pojmenované Solid, což bude výhodné při seskupování objemů do dvou partů. Postup je detailně zobrazen na Obr. 12.3, Obr. 12.4, Obr. 12.5, Obr. 12.6. Po vytvoření geometrie můžeme ukončit program *Design Modeler* a uložit projekt ve *Workbench*.



Obr. 12.5 Další rozdělení jednotlivých objemů

Modelování přestupu tepla a vedení tepla v pevné stěně





Obr. 12.7 Kompletní geometrie výpočetní oblasti

ANIMACE

Animaci procesu tvorby geometrie se dvěma doménami si může student zobrazit

- odkazem ANIMACE •
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad6\ soubor Priklad6_Video1.exe

Tvorba výpočetní sítě

Výpočetní síť vytvoříme obdobným způsobem jako u přikladu č.1 viz kap 6.3. Nyní je však nutné pojmenovat také plochy, které vytvářejí ve výpočtové oblasti hranici mezi tekutinou a pevnou látkou. Zde se tedy nacházejí páry rovin, které jsou geometricky totožné, přičemž jedna rovina náleží objemu *Fluid* a druhá *Solid*. Abychom byli schopni správně vybrat roviny, je vhodné během procesu pojmenování vždy potlačit zobrazení druhého objemu. Nejprve potlačíme zobrazení domény, která reprezentuje pevné těleso. Ve stromu sítě v položce *Geometry* vybereme levým tlačítkem myši položku *Solid*. Pravým tlačítkem vyvoláme kontextové menu a vybereme příkaz **P Hide Body**. Potlačení zobrazení objemu je signalizováno snížením sytosti barvy zatržítka u položky *Solid*⁻¹ **Solid**. Tím je potlačeno zobrazení tohoto objemu. Nyní můžeme bez problému pojmenovat všechny plochy, které náleží tekutině, tedy objemu *Fluid*. Po pojmenování poslední plochy zobrazíme příkaz **Show Body**. Následně potlačíme zobrazení položku *Fluid*, pojmenujeme plochy náležející doméně, která reprezentuje pevné těleso a zobrazíme položku *Fluid*.



Obr. 12.8 Potlačení zobrazení domény Solid

Jednotlivé plochy pojmenujeme podle následujícího obrázku viz Obr. 12.9. Levou a pravou stěnu domény *Solid* (vzhledem k nárysu domény solid) není nutné pojmenovávat. Také boční stěny, které představují hranici 2D oblasti můžeme, zahrnout do jedné pojmenované sekce a pojmenovat ji SYMMETRY s příponou dle domény.



Obr. 12.9 Pojmenování ploch

Všechny objemy budeme síťovat metodou Sweep, tj. vysunutí, abychom nemuseli ručně definovat všechny objemy vysunutí. Je možné využít automatický nástroj, který je schopen rozpoznat objemy, u kterých je možné využít metodu *Sweep*. Ve stromu sítě vybereme položku ^{Mesh}. U této položky vyvoláme pravým tlačítkem kontextové menu a zvolíme příkaz **Show Sweepable Bodies**. Tento příkaz označí všechny objemy, čímž signalizuje, že u všech objemů je nastavena tato metoda. Při použití této metody se ale ve stromu nezobrazí metoda, kterou je možné editovat, proto je nutné definovat také počet elementů na přímkách kolmých k síti (ty, které reprezentují šířku oblasti). Jelikož je úloha řešena jako 2D, bude u těchto přímek pouze jeden element.



Obr. 12.10 Označení přímek při procesu síťování

Stejně jako při procesu pojmenování ploch, je také v tomto případě nutné potlačovat zobrazení jednotlivých domén, tak aby bylo možné vybrat pouze přímky, které náležejí doméně. Při výběru přímek je také vhodné vybírat přímky pomocí nástroje pro skupinový výběr \bigcirc . Výběr přímek se tím značně zrychlí. Po definování všech přímek je možné vygenerovat síť příkazem \bigcirc Update. Po vygenerování sítě ještě provedeme vizuální kontrolu. Síť by měla být zhuštěna směrem ke všem stěnám, kterými přestupuje z horké pevné stěny do studené tekutiny. Po vygenerování sítě můžeme ukončit program *Meshing* a následně uložíme projekt ve *Workbench*.

Důležité je si uvědomit, že proces síťování probíhá pro obě domény samostatně, proto bylo nutné v některých případech definovat počet elementů na separátně pro oba objemy. Parametry v následující tabulce mohou být u položky *Bias* odlišné. To je způsobeno směrem kreslení jednotlivých přímek (tj. jejich orientací), proto je nutné provádět vizuální kontrolu.

Přímky č.	Počet elementů	Nastavení	Zjemnění	Velikost	Zobrazena
	Number of	Behavior	Bias Type	Bias Factor	doména
	Divisions				
1	1	Hard	No Bias		Fluid,Solid
2	40	Hard		5	Fluid,Solid
3	30	Hard		5	Fluid,Solid
4	20	Hard	No Bias	5	Fluid,Solid
5	50	Hard		5	Fluid
6	50	Hard		5	Fluid
7	200	Hard		5	Fluid
8	200	Hard		5	Fluid
9	50	Hard		5	Solid
10	50	Hard		5	Solid
11	200	Hard		5	Solid

Tab. 12.1 Nastavení síťování u jednotlivých přímek



Obr. 12.11 Označení přímek při procesu síťování

ANIMACE

Animaci procesu řešení simulace a analýzy výsledků simulace s dodatkovou proměnnou si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad6\ soubor Priklad6_Video2.exe

12.2DEFINICE CFD SIMULACE S PEVNÝM TĚLESEM

Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vytvořit simulaci s pevnou stěnou a vedením tepla v této stěně.
- definovat nový materiál.
- vytvořit interface pro přenos dat mezi tekutinou a pevnou látkou.



VÝKLAD

Definice CFD simulace s pevným tělesem

Výpočetní síť obsahuje plochy, které jsou polohou identické, přičemž jedny náleží tekutině a druhé náleží pevné stěně. Po načtení se automaticky vytvoří doména *Default Domain*. Tu nyní **nebudeme** přejmenovávat, ale vytvoříme nejprve materiál izolace, který není definován v databázi. Nový materiál vytvoříme kliknutím na ikonu . Jméno materiálu bude *Isolation*. Parametry izolace jsou definovány v zadání. Postup definice je zobrazen na Obr. 12.12

😨 Insert Material 🛛 🖓 🔜 🔀		Outline Material: Isola	tion	×
Name Isolation		Basic Settings Materi	al Properties	
OK Cancel		Option C Thermodynamic Propert Equation of State Option Molar Mass Density	Seneral Material ies Value ▼ 1.0 [kg kmol^-1] 2300 [kg m^-3]	
Outline Material: Isolation Details of Isolation	×	Option Specific Heat Capacity	Value 500 [J kg^-1 K^-1]	
Basic Settings Material Properties		Reference State		
Option Pure Substance -		Transport Properties		Ð
Material Group User 👻		- 🔽 Thermal Conductiv	ity	
I Material Description		Option	Value 👻	
Thermodynamic State		Thermal Conductivity	1.2 [W m^-1 K^-1]	
Thermodynamic State Solid		Radiation Properties		Œ
Coord Frame	- E	Buoyancy Propertie	S	••••

Obr. 12.12 Definování materiálových vlastností izolace

Basic Settings(základn	í nastavení)
Option	- zde se definuje, o jaký typ materiálu se jedná, např. čistá látka, homogenní
_	směs, binární směs, reagující směs atd. V našem případě se jedná o prostý
	materiál, ponecháme tedy volbu Pure Substance.
Thermodynamic State	– zde se definuje, o jaký typ látky se jedná, např.: plyn, kapalina, pevná látka.
	V našem případě jde o pevnou látku, vybereme tedy volbu Solid.
Materiál Properties (m	nateriálové vlastnosti)
Molar Mass	– zde definujeme molární hmotnost dané látky. Pro náš případ je tato veličina
	irelevantní, ponecháme zde tedy výchozí hodnotu 1 kg/kmol.
Density	- zde se definuje hustota materiálu. Také tato hodnota je v našem případě
	nepodstatná, ale vepíšeme zde hodnotu ze zadání, tedy 2300 kg/m ⁻³ .
Specific Heat Ca	– zde se definuje tepelná kapacita. Ze zadání je tedy 500 J/(kg. K).
Thermal Conducti	– zde se definuje tepelná vodivost materiálu. Ze zadání je tedy 1.2 W/(m.K).

Definici materiálu potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Následně by se měl ve stromu simulace objevit nový materiál se jménem *Isolation*.

Program *CFX-Pre* je schopen automaticky detekovat počet domén, a současně vytvořit přechodovou stěnu tzv. Interface. My ale z cvičných důvodu tuto automaticky vytvořenou položku vymažeme a později vytvoříme *Interface* mezi pevným tělesem a tekutinou manuálně. Ve stromu simulace tedy vybereme položku **Default Fluid Fluid Interface**, vyvoláme pravým tlačítkem kontextové menu a vybereme příkaz Delete. Po této úpravě by měla ve stromu zbýt pouze položka doména *Default Domain* a stěnová okrajová podmínka *Default Domain Default*.

Novou doménu vytvoříme kliknutím na ikonu ^{III}. Jméno domény bude *Solid*. Základní nastavení je zobrazeno na Obr. 12.13

General Options (základní nastavení)

Location	 – zde definujeme objemy, které budou reprezentovat pevnou stěnu. Jedná se o objemy B37, B38 a B47. Ty vybereme ze seznamu, který vyvoláme kliknutím
	na tlačítko. Více entit vybereme levým tlačítkem při současném stisknutí
	klávesy Ctrl.
Domain Type	- zde se definuje, o jakou oblast jde. V našem případě jde o pevnou látku,
	vybereme tedy volbu Solid Domain.
Solid List	- zde se definuje materiál pevné stěny. Vybereme tedy námi vytvořený
	materiál <i>Isolation</i> ze seznamu, který zobrazíme tlačítkem .
Ostatní položky ponec	háme ve výchozím nastavení.

Solid Model (výpočetní model pro pevnou látku)

Heat Transfer	- zde je definována položka Thermal Energy. Jiná možnost zde není a nelze
	tedy také nic zvolit.
Thermal Radiation	– zde definujeme termickou radiaci v pevné látce. V našem případě tepelnou
	radiaci neřešíme, proto ponecháme volbu None.

Initialisation (výpočetní model pro pevnou látku)

Initial Conditions – pevná látka vyžaduje kromě globální inicializace také vlastní inicializaci. Definujeme zde tedy výchozí teplotu pevné stěny. Můžeme zde ponechat volbu *Automatic* a nebo definovat teplotu 1000°C.

Modelování přestupu tepla a vedení tepla v pevné stěně



Obr. 12.13 Definování domény Solid

Definici oblasti pro pevnou stěnu potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Jelikož jsme nepřejmenovali automaticky vytvořenou oblast *Default Domain*, odebraly se z této oblasti všechny objemy, které jsme vybrali při definici pevné stěny (B37, B38, a B47). V oblasti *Default Domain* tedy nyní zbyly pouze entity, které reprezentují oblast s proudící tekutinou (vzduchem). Výpočetní oblast *Default Domain*

můžeme nyní přejmenovat na *Fluid*, viz Obr. 6.35. Ve stromu simulace by nyní měly být dvě výpočetní oblasti pojmenované *Fluid* a *Solid*, viz Obr. 12.14.



Obr. 12.14 Zobrazení stromu simulace po definování obou domén

Ve výpočetní oblasti *Fluid* budeme ještě definovat základní nastavení. Výpočet bude probíhat bez vztlakových členů (*Fluid* \rightarrow *Basic Settings* \rightarrow *Buoyancy* \rightarrow *Not Buoyant*). Proudící materiál bude dle zadání vzduch při 25°C (Air at 25°C). Turbulentní model bude dle zadání *k-ɛ* (*Fluid* \rightarrow *Fluid Models* \rightarrow *Turbulence* \rightarrow *k-Epsilon*). V modelu proudění tekutiny musíme definovat také řešení rovnici energie pro řešení vedení a přestupu tepla. V záložce *Heat Transfer* tedy musíme zvolit *Thermal Energy*. (*Fluid* \rightarrow *Fluid Models* \rightarrow *Heat Transfer* \rightarrow *Thermal Energy*). Pokud tak neučiníme, bude v dolním okně varovné hlášení o nesmyslnosti definice úlohy. Definici oblasti pro tekutinu potvrdíme Apply a *Close*, anebo *OK*.

Outline Domain: Fluid	×	Outline Domain	: Fluid		
Details of Fluid in Flow Analysis 1		Details of Fluid in Fl	ow Analysis 1		
Basic Settings Fluid Models Initialisation		Basic Settings	Fluid Models	Initialisation	
Location and Type	^	Heat Transfer			Ξ
Location B105,B106,B97		Option	Thermal	l Energy	-
Domain Type Fluid Domain 👻		Incl. Viscous [Dissipation		
Coordinate Frame Coord 0		Turbulence			Ξ
Fluid and Particle Definitions		Option	k-Epsilor	n	•
Fluid 1		Wall Function	Scalable		
		-Advanced Turbu	ulence Control		
	=	Combustion			
		Option	None		•
Option Material Library -		- Thermal Radiation	n		
Air at 25 C		Option	None		
Morphology		Option	Hone		•
Option Continuous Fluid 🗸					
Domain Models					
Pressure					
Reference Pressure 1 [atm]					
Buoyancy					
Option Non Buoyant 👻	-				

Obr. 12.15 Definování domény Fluid

Při přestupu tepla z pevné látky do tekutiny musí být definována přechodová plocha, tzv. *Interface*, na které se budou předávat během výpočtu data mezi tekutinou a pevnou látkou. Jak již bylo řečeno výše, z cvičných důvodů si tento interface nadefinujeme ručně.

Interface vytvoříme kliknutím na ikonu 📁 a pojmenujeme jej *Fluid Solid Interface*. Nastavení je zobrazeno v Obr. 12.16.

	Insert Domain Inte		Indikace Interface
Outline Doma	in Interface: Fluid Solid Interface	×	
Details of Fluid Sol Basic Settings	Additional Interface Models		
Interface Type	Fluid Solid	•	
Interface Side	1		() is the (providence) (%)/2 (constrained by (
Domain (Filter)	Fluid		
Region List	INTERFACE_FLUID		The second secon
-Interface Side 2	2		
Domain (Filter)	Solid		
Region List	INTERFACE_SOLID		
-Interface Mode	ls		
Option	General Connection	-	Flow Analysis 1
-Frame Change	/Mixing Model		
Option	None 👻		✓ J [‡] Fluid Default
Pitch Change		-8-	I Fluid Solid Interface Side 1
Option	None		✓ ☑ ISolid Interface Side 2
Mesh Connectio	on Method		☑ ♫‡ Solid Default
-Mesh Connecti	ion		P _{t=0} Initialisation
Option	Automatic 🗸		
Intersect	tion Control	- • -	

Obr. 12.16 Zobrazení definice přechodové plochy *Interface* mezi tekutinou a pevnou látkou.

Basic Settings (základní nastavení)

Interface Type	– zde definujeme, o jaký typ přechodové plochy se jedná. Existuje několik
	variant. V našem případě jde o přestup tekutina - pevná látka, zvolíme tedy
	Fluid Solid.
Interface Side 1 a 2	 zde se definují geometrické entity přechodové oblasti.
Domain (Filter)	– zde je možné filtrovat entity jednotlivých domén z důvodu lepší orientace.
	V jedné položce tedy zvolíme <i>Fluid</i> a v druhé <i>Solid</i> . Na pořadí nezáleží.
Region List	– zde se definují plochy, na nichž se stýká tekutina a pevná látka. Tyto plochy
	jsou již interně pojmenovány v souboru se sítí. V doméně Fluid zvolíme
	INTERFACE_FLUID a v doméně Solid zvolíme INTERFACE_SOLID.
Ostatní položky ponech	náme ve výchozím nastavení. Definici Interface potvrdíme Apply a Close, anebo

OK. Následně by se ve stromu měla objevit položka \mathbb{V} \mathbb{F} -Fluid Solid Interface a u obou domén nová

okrajová podmínka *Fluid*- **I** Fluid Solid Meterface Side 1 a *Solid* - **I** Fluid Solid Interface Side 2. Pojmenování se může lišit podle pořadí, v němž byly vybrány jednotlivé domény při definici. Všechny okrajové podmínky budeme definovat standardním způsobem. Při definování každé okrajové podmínky je nutné na počátku zvolit, pro jakou doménu je okrajová podmínka definována. Při kliknutí na ikonu definice okrajových podmínek **I** se zobrazí panel, v němž jsou zobrazeny existující domény. V našem případě *Fluid* a *Solid*. Vybereme tak jednu z položek a dále postupujeme obvyklým způsobem, zvolíme jméno krajové podmínky atd., viz Obr. 12.17.



Obr. 12.17 Zobrazení postupu volby domény při vytváření okrajové podmínky

Všechny nezbytné podklady pro tvorbu okrajových podmínek jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Okrajová p	odmínka	Zákla	udní nastavení	Podrobné nasta	vení	
Insert Bo	oundary	Basic Settings		Boundary Deta	ails	
Jméno	Oblast	Typ podmínky	Umístění			
Name ²⁾	$Domain^{1)}$	Boundary Type	Location			
Symmetry Fluid	Fluid	Symmetry	SYMMETRY_FLUID		\ge	
				Rychlost Normal Speed	10 m/s	
	Eluid			Int. Turbulence	0.05	
Inlat		Inlat		Intensity	(5%)	
Innet	Fluid	met	INLEI	Délkové měřítko	0.2m	
				Eddy Len. Scale	0.5111	
				Teplota	20°C	
				Temperature	20 C	
Outlet	Fluid	Outlet	OUTUET	Statický tlak	0Pa	
Outlet	Tiulu	Outlet	OUILEI	Avr. Stat. Pressure	Ura	

Tab. 12.2 Tabulka okrajových podmínek pro kapalinu, doména Fluid

Tab. 12.3 Tabulka okrajových podmínek pro pevnou látku

Okrajová p	odmínka	Základní nastavení		Podrobné nastavení			
Insert Bo	oundary	Basic Settings		Basic Settings		Boundary L	Details
Jméno Name ²⁾	Oblast Domain ¹⁾	Typ podmínky Boundary Type	Umístění <i>Location</i>				
Symmetry Solid	Solid	Symmetry	SYMMETRY_SOLID		$\left \right\rangle$		
Hot Wall	Solid	Wall	HOT_WALL	Teplota <i>Temperature</i>	1000°C		

Poznámka: 1) Pokud nebylo provedeno přejmenování oblasti na *Fluid*, bude zachováno standardní pojmenování *Default Domain*.

2) Jméno (Name) je zvoleno, uživatel může použít libovolné pojmenování.

U obou domén zbyly automaticky definované stěny *Fluid Default* a *Solid Default*. Tyto okrajové podmínky jsou definovány jako dokonale izolované stěny a odpovídají tedy požadavkům zadání, proto tyto dvě podmínky nemusíme editovat.

□ Inicializace a nastavení řešiče

Úlohu je nutné před výpočtem inicializovat. Inicializaci provedeme kliknutím na ikonu ¹tan. Jelikož je použit turbulentní model k- ε , je nutné do inicializace zahrnout také turbulentní vírovou disipaci, je tedy nutné zaškrtnou položku *Turbulence Eddy Dissipation*. Všechny položky je možné ponechat v nastavení *Automatic*. Rychlejší řešení ovšem obdržíme inicializací rychlosti u na 5 m/s a teploty na 20°C, viz Obr. 12.18. Volbu potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*.

Nyní zbývá ještě definovat nastavení řešiče. Definování provedeme kliknutím na ikonu Následně se v pracovním okně zobrazí základní okno se standardním nastavením, viz Obr. 12.18.. U tohoto příkladu zvýšíme počet iterací na 1000. Jelikož se v této úloze řeší přestup tepla, je ještě vhodné zahrnout do výpočtu kontrolu dodržení zákona zachování *Conservation Target* a definovat hodnotu 0.001. Maximální nerovnováha hmoty, hybnosti a energie tedy může být maximálně 0.1%. Nastavení potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Za povšimnutí stojí také další položka, která se objeví vždy, když se řeší přestup tepla pevnou stěnou. Kromě standardní položky *Fluid Time Scale*, která reprezentuje tekutinu a je zde možné definovat časové měřítko turbulence, jde o položku *Solid Time Scale*. Zde je možné definovat zcela samostatně časové měřítko vedení tepla. ze základní podstaty asi tušíme že, fluktuace teploty v pevné stěně budou vlivem tepelné kapacity řádově delší než u kapaliny. U tohoto jednoduchého příkladu můžeme ponechat nastavení u obou domén volbu *Auto Time Scale*, která zaručí optimální běh simulace, protože časové měřítko bude odhadováno během výpočtu na základě empirických vzorců.

			Outline Solve	er Control		E
		-	Details of Solver (Control in Flow Analysis 1	L	
Outline Initialisati	on	×	Basic Settings	Equation Class Settings	Advanced Options	1
etails of Global Initia	alisation in Flow Analysis 1			Francis		
Global Settings			Option	First Order	•	
Coord Frame			-Convergence (Control		
Initial Conditions			Min. Iterations	1		Г
Velocity Type	Cartesian	•	Max. Iterations	1000		
-Cartesian Velocity	Components		-Fluid Timescale	e Control		
Option	Automatic with Value 🛛 👻	•	Timescale Con	trol Auto Timescale	•	
U	5 [m s^-1]		Length Scale C	Option Conservative	•	
v	0 [m s^-1]		Timescale Fact	or 1.0		
w	0 [m s^-1]			n Timescale		
Static Pressure		-8-	-Solid Timescale	e Control		
Option	Automatic 🗸	-	Solid Timescale	Auto Timescale	•	=
Temperature	<u></u>		Solid Tim	escale Factor		
Ontion	Automatic with Value		Convergence (Criteria		
option			Residual Type	RMS	•	
Temperature	20 C 🔻		Residual Target	1.E-4		
Turbulence			- 🔽 Conserva	tion Target	8	
Option	High Intensity and Eddy Visc \prec	•	Value	0.001		
			Elapsed W	all Clock Time Control		
			interrupt (Control	Œ	

Obr. 12.18 Zobrazení inicializace a nastavení řešiče

Nastavením řešiče potvrdíme Apply a Close, anebo OK. Program CFX-Pre ukončíme a spustíme automatické řešení ve Workbench prostřednictvím tlačítka ⁷ Update Project</sup>. Následně úlohu iteračně

vyřešíme. Během řešení je možno sledovat běh reziduálů. V položce *Heat Transfer* si můžeme povšimnou, že obsahuje dvě křivky *H-Energy* a *T-Energy*. Položka H-Energy reprezentuje konvergenci rovnice energie v tekutině. Energie v tekutině se řeší prostřednictvím entalpie, která se běžně označuje písmenem h, proto tedy *H-Energy*. U pevného tělesa se řeší rovnice energie prostřednictvím termodynamické teploty T, proto tedy *T-Energy*, která reprezentuje pevnou látku.

Animaci procesu definice simulace s pevnou stěnou si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad6\ soubor Priklad6_Video3.exe

12.3ANALÝZA VÝSLEDKŮ



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• vytvořit vyhodnocovací entity pro jednotlivé domény v simulaci.



Cíl

Po ukončení výpočtu jsou výsledky automaticky načteny do položky Results. Editací této položky spustíme *CFD-Post*. Definujeme si vyhodnocovací rovinu (XY, Z = 0.005). Při definování rovin (i jiných entit, přímka bod atd.) je možné specifikovat, zda se má rovina vytvořit ve všech doménách, nebo pouze v některé z nich. V našem případě je tedy možné rovinu se jménem *Plane 1* proložit doménou *Fluid*, nebo *Solid* a nebo oběma současně tj. volbou *All Domains*. viz Obr. 12.19. Rovinu *Plane 1* proložíme oběma doménami, zvolíme tedy v položce *Domains* volbu *All Domains*. Tuto rovin pak použijeme k zobrazení pole rychlosti, tlaku a turbulentní kinetické energie. Zobrazení se provede pouze v doméně Fluid, protože v doméně *Solid* neexistuje veličina tlak, rychlost, turbulentní kinetická energie atd. V doméně *Solid* je možné naopak vyobrazit pouze teplotu, což je jediná fyzikální veličina společná v této simulaci pro obě domény. Stejné omezení jako u plochy je možné provést také u obrázku, při zobrazení je tak možné v položce *Domains* zvolit Fluid, Solid nebo *All Domains*. Uživatel má tedy dvě možnosti jak omezit zobrazení na vybranou doménu. 1) Omezit plochu při její tvorbě a v obrázku zvolit *All Domains*. 2) Plochu vygenerujeme přes všechny domény a v obrázku omezíme zobrazení vybráním zvolené domény.

Z důvodu velkého teplotního rozsahu je vhodné při zobrazení teploty vzduchu změnit rozsah z *Local* na *User Specified* a definovat rozsah 20-100°C. Tím se zlepší názornost obrázku.

Modelování přestupu tepla a vedení tepla v pevné stěně

~		A6 : Schod s pevrou stenou - CFD Post	
Details of Pl a	ane 1	File Edit Session Insert Tools Help	
Course		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	R≈ ⋫♪ N ぷ ↓ ○ × ⊠ Ⅲ E A B O □ ↓ / 1 1 1 4 + D
Geometry	Colour Render View	Outine Variables Expressions Calculators Turbo	% S+QQQ @ □• %
		Plane 1	View1 *
Domains	All Domains	··· With Wretane	
Definition		V W Report	
Dennuon	N	> 2 @ Fie faport	Clancemmercial use only
	AN DIAL	P D Mesh Report	
Method	XY Plane 👻	👔 🔄 🍙 Solution Report	
		Cetter of Plane 1	
7	0.005 [m]	Georett Calor Bende Yes	
-	orega full	Domans All Contains	
		Definition	
		Method All Plane	
	Zde volíme do	ménu z akatel	
		menu	
tails of Plan	iel V	Plane Bounds - None Blane Tune - Slice	
Geometry	Colour Render View	Contraction of the Contraction o	
beomed y	Colour Relider View		
ompine	All Domains -		Y .
omains			0 1000 (m)
Definition	Fluid		0.500
	Solid 68	Ande Benet	Park In
Method	All Domains		3D Viewer Table Viewer Chart Viewer Connent Viewer Report Viewer
-iculou			
Z	0.005 [m]		
Plane Bound	ds - None	E	
Plane Type	Sice	H	
riane type.	- Once		



Obr. 12.19 Volba domény při generování roviny Plane 1.


Obr. 12.20 Zobrazení teplotního pole ve vzduchu



Obr. 12.21 Zobrazení teplotního pole v izolaci



Obr. 12.22 Zobrazení teplotního pole v celé oblasti

Dále si vyobrazíme teplotní profil v celé oblasti. Pro vyobrazení grafické závislosti nejprve vytvoříme přímku pomocí bodů, které jsou definovány v následující tabulce.

Imáno		Bod 1		Bod 2			Počet	
Mamo	Point 1			Point 2			vzorků	
Name	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Samples	
Line 1	3.5	0	0.005	3.5	1	0.005	250	

Tab. 12.4 Tabulka pro definici přímky

Následně pak vytvoříme graf a vyobrazíme teplotu na vytvořené přímce. Návod pro tvorbu grafu je v kap. 6.6.



Obr. 12.23 Grafické zobrazení průběhu teploty napříč výpočetní oblastí.

Na obrázku je vidět lineární pokles teploty v izolaci v důsledku vedení tepla (kondukce). V blízkosti stěny je vidět rychlý nárůst teploty způsobený přestupem tepla do vzduchu (konvekce). Dále od stěny je již nárůst teploty menší. To je způsobeno promícháváním tekutiny, tedy turbulencí, která homogenizuje proud tekutiny oproti oblasti v těsné blízkosti stěny, kde je turbulence relativně malá.



Animaci procesu řešení simulace a analýzy výsledků simulace s pevnou stěnou si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad6\ soubor Priklad6_Video4.exe

SHRNUTÍ POJMŮ Č. 12

Interface je plocha, na které dochází k přenosu dat mezi dvěma doménami.

Thermodynamic State je termodynamická stav látky, tj. tato položka definuje skupenství (pevná látka, kapalina, plyn).

Time Scale definuje časové měřítko proudění.

OTÁZKY Č. 12

- 1. Proč je nutné při definování geometrie vytvořit dva nezávislé objemy (dva party)?
- 2. Jaké základní fyzikální vlastnosti je nutné definovat u pevné látky, kterou je nutné vytvořit manuálně?
- 3. Jaké základní fyzikální vlastnosti je nutné definovat u tekutiny(plyn/kapalina), kterou je nutné vytvořit manuálně?
- 4. Proč je nutné definovat v simulaci Interface?
- 5. Myslíte si, že by bylo vhodné do simulace zahrnout gravitaci? Odpověď zdůvodněte.
- 6. Proč je možné u pevné látky zobrazit pouze teplotu?

13 MODELOVÁNÍ MULTIFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ VODA-VZDUCH

13.1VYTVOŘENÍ PROJEKTU A DEFINOVÁNÍ MULTIFÁZOVÉ CFD SIMULACE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vytvořit simulaci multifázového proudění.
- definovat morfologii dispergovaných částic.



D Popis úlohy

V této kapitole budeme modelovat rozptyl bublinek v proudu vody. Ve výpočtové oblasti bude v daném bodě pomocí geometricky zanedbatelné trysky injektován vzduch do vody. Vzduch ve formě bublinek pak bude dále unášen proudící vodou a bude ji výrazně ovlivňovat. V této úloze jsou oba materiály rovnocenné, proto nelze použít přístup popsaný v kapitole 10 a 11. Ve výpočtu tedy budou figurovat oba materiály ve formě tekutiny a budou na sobě nezávislé. Při modelování tedy využijeme multifázový model založený na *Eulerově* přístupu. Na rozdíl od *Lagrangeova* přístupu viz kap10 (malý objemový zlomek), zde může být objemový zlomek obou fází v rozsahu 0-100%. Současně ale nelze vyhodnotit trajektorie jednotlivých částic jako u *Lagrangeova* modelu.



Obr. 13.1 Schematický náčrt řešené oblasti s definicí problému

Rozměry oblasti a okraj	jové podmínky		
	Délka oblasti	L = 5 m	
	Výška oblasti	d = 0.5 m	
	Výška schodu	$d_s = 0.2 \text{ m}$	
	Délka schodu	$L_s = 1 \mathrm{m}$	
	Rychlost na vstupu	v = 8 m/s	
	Statický tlak na výstupu	0 Pa (relativně)	
	Proudící tekutina	Voda, Vzduch	
	Vzduch ve formě bublin	d _b =5mm	
	Průtok vzduchu tryskou	0.0025 kg/s	
	Rychlost vzduchu	5 m/s	

Výpočet Reynoldsova čísla na vstupu

$$Re = \frac{v (d - d_s)}{v}$$
$$Re = \frac{8 (0.5 - 0.2)}{1 \cdot 10^{-6}}$$

Re = 2400000

Jedná se tedy o vyvinuté turbulentní proudění, použijeme model k-ɛ.

Modifikace projektu

Pro výpočet použijeme celý projekt v příkladě č.1v kap10. Nejprve si vytvoříme nový pracovní adresář C:/Work/Priklad7 (nebo jiný podle uvážení uživatele). Spustíme program Workbench a

pomocí ikony otevřeme projekt *Priklad4.wbdb*. Následně ho pomocí ikony uložíme jako *Priklad7.wbdb* do nově vytvořeného adresáře *C:/Work/Priklad7*. Tím jsme vytvořili kopii, kterou je možné editovat, aniž by byl změněn původní projekt. Projekt již obsahuje dvě simulace se sdílenou výpočetní sítí. Tuto úlohu budeme řešit ve dvou variantách: 1) bez vlivu gravitace, 2) s vlivem gravitace. Projekt tedy ponecháme tak, jak je nastaven, pouze u obou simulací provedeme u položek setup. Solution, a Results reset nastavení. Tím zůstane v projektu definována pouze geometrie a síť.

ANIMACE

Animaci procesu modifikace projektu si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře **Animace\Priklad7**\ soubor **Priklad7_Video1.exe**

Definování multifázové CFD simulace

Výpočetní oblast přejmenujeme ze standardního názvu Default Domain na Fluid. Proudící tekutiny jsou vzduch při 25°C (Air at 25°C) a voda (water). Postup při vytváření multifázového proudění založeného na Eulerově přístupu je velice jednoduchý. V materiálovém listu definujeme dvě proudící tekutiny. Abychom si ukázali celý postup, nejprve vymažeme z registru, který je v Basic Settings v položce Fluids and Particle Definitions, defaultně vytvořené kontinuitní médium Fluid 1 pomocí tlačítka 🔀. Nyní je registr prázdný a neobsahuje žádnou tekutinu. Teď tedy můžeme pomocí tlačítka wytvořit nové tekutiny. První pojmenujeme *Water*. Následně zvolíme v položce *Material* ze seznamu položku Water. V položce Morphology ponecháme volbu Continuous Fluid. Což odpovídá zadání, protože voda je v našem případě spojité médium. Celý postup opakujeme ještě jednou pro položku vzduchu. Jméno bude Air, jako materiál vybereme Air at 25°C a v položce Morphology vybereme Dispersed Fluid., protože vzduch bude ve formě bublinek. Dále je ještě nutné definovat průměr bublin Mean Diameter. Dle zadání se předpokládá, že bublinky budou mít průměr 5 mm. Definovat lze ještě Minimum Volume Fraction, zde se definuje, zda je možné rozšířit zadání o minimální objemový zlomek obou fází. Dále je možné definovat parametr Maximum Packing, zde se definuje náchylnost bublin nebo kapiček ke tvorbě shluků. Tato konstanta bývá pro bubliny vzduchu ve vodě 0.63. My toto rozšíření v této úloze nepoužijeme.

Pokud bychom chtěli definovat další látku, celý postup opakujeme. Eulerův přístup umožňuje simulovat tok libovolného počtu tekutin (jak plyny, kapaliny, pevné částice, bubliny kapičky atd.),

takže můžeme vybrat libovolný počet materiálů, omezení je pouze hardwarové (RAM, CPU atd.). V našem případě simulujeme pouze tok dvou látek, v definici tak již nepokračujeme, viz Obr. 13.2.

Fluid and Particle Definitions... Ξ -Fluid 1 X 15 Ξ × Fluid and Particle Definitions... Ξ X ٦ 🗃 Instrt Fluid Definiti... 👔 🖽 Insert Fluid Definiti... 💡 💻 🔀 Name Water Name Air OK Cancel 19K Cancel Basic Settings Fluid Models Initialisation Basic Settings Fluid Models Fluid Specific Models Fluir Location and Type Location and Type Assembly • ... Location Location Assembly • ... -Domain Type Fluid Domain Fluid Domain Domain Type -Coord 0 Coordinate Frame • Coordinate Frame Coord 0 * Fluid and Particle Definitions... Ξ Fluid and Particle Definitions... ⊡ Water Air <u>*</u> Water X X Ξ Water Air Ξ Option Material Library Ŧ Option Material Library -Material Water -Air at 25 C ... Material • ... Morphology Ξ Ξ Morphology Continuous Fluid Option Dispersed Fluid Ŧ Option * Ŧ Minimum Volume Fraction Mean Diameter 5 [mm] Minimum Volume Fraction Ð Domain Models Maximum Packing Đ Ξ Pressure Reference Pressure 1 [atm] Domain Models Pressure Ξ Ξ Buoyancy 1 [atm] Reference Pressure Non Buoyant + Option

Obr. 13.2 Definice mutifázového modelu a morfologie jednotlivých tekutin

Potvrzením volby materiálů se rozšíří počet záložek a je nutné definovat nové parametry. Položka *Fluid Models* definuje základní parametry modelu. Na rozdíl od předchozích příkladů jsou zde pouze základní parametry týkající se multifázového modelu, viz Obr. 13.3.

Outline Doma	ain: Fluid		×
Details of Fluid in I	Flow Analysis 1		
Basic Settings	Fluid Models	Fluid Specific Models	Flui + +
Multiphase			
Homogeneo	ous Model		
-Free Surface	Model		
Option	None	•	
Heat Transfer			
Homogeneo	ous Model	<i>⊳</i>	
Option	None		•
Turbulence			
Homogeneo	ous Model		
Option	Fluid De	ependent	•
Combustion			
Option	None		•
-Thermal Radiat	ion		
Option	None		•

Obr. 13.3 Definice základních parametrů mutifázového modelu

Fluid Models (Modely tekutiny)

Multiphase Options	- zde definujeme, zda se jedna o homogenni model (<i>Homogenous Model</i>) a
	zda je v simulaci volná hladina (Free Surface Model). Homogenní model
	předpokládá dokonalé promísení látek (např. dva plyny), což není náš případ.
	Model volné hladiny předpokládá simulaci dvou kontinuálních tekutin, ale
	rozhraní musí být zachyceno sítí (např. modelování obtékání lodě a sledování
	čeření hladiny). V našem případě jsou bublinky řádově menší než síť, proto
	tuto voibu nepouzijeme.
Heat Transfer	- zde se definuje přestup tepla. Teplotu neřešíme, proto ponecháme volbu
	None. Homogenní model v této položce předpokládá společnou teplotu obou fází
Turbulance	nuzi.
Turbulence	- Zde se definitje přístup k modelování turbulence. Homogenní model v tomto případě předpokládá identické turbulentní parametry obou fází (opět vhodné např. pro dokonale mísitelné látky). Tuto volbu tedy nepoužijeme a zvolíme položku <i>Fluid Dependent</i> . To znamená, že model turbulence bude definován pro obě látky samostatně (nezávisle na sobě).

V záložce *Fluid Specific Models* budeme definovat model turbulence pro jednotlivé tekutiny. Pro vodu použijeme vzhledem k Re číslu turbulentní model *k-Epsilon*. Pro vzduch model pro dispergovanou tekutinu *Disperse Phase Zero Equation*, protože pro dispergovanou látku neexistuje v současnosti žádný jiný turbulentní model. viz.Obr. 13.4.

ails of Fluid in I	Flow Analysis 1		<u> </u>	Details of Fluid in Flow Analysis	:1	
Basic Settings	Fluid Models	Fluid Specific Models	Fluir + 🔸	Basic Settings Fluid Models	Fluid Specific Models	Fluid
Fluid			-8-	Fluid		
Air Water				Air Water		
Air	6			Water		
Air Turbulence				Water		
Air Turbulence Option	Dispe	rsed Phase Zero Equa 👻		Water Turbulence Option	psilon 🗸	
Air Turbulence Option Advanced	Dispe Turbulence Contro	rsed Phase Zero Equa 👻		Water Turbulence Option k-E Wall Function	psilon 🗸	
Air Turbulence Option Advanced	Dispe Turbulence Contro	rsed Phase Zero Equa 👻		Water Turbulence Option k-E Wall Function Wall Function S	psilon •	

Obr. 13.4 Turbulentních modelů u obou tekutin

Stejně jako v *Lagrangeově* modelu v kap 10 je také u *Eulerova* modelu nutné definovat vzájemný vztah obou látek. Tyto parametry jsou definovány v záložce *Fluid Pairs Models*.

Itline Domain: Fluid ils of Fluid in Flow Ana Fluid Models Fluid ! Air Water	lysis 1 Specific Models Fluid Pair	Models	
Air Water Surface Tension Co Surf. Tension Coeff. Interphase Transfer Option Minimum Volume I Momentum Transfer	Defficient 0.072 [N m^-1] Particle Model ← Fraction for Area Density		Rozvinutí menu definio dalších součinitelů
Drag Force Option	Schiller Naumann 👻	\sim	
-Non-drag forces			
-Virtual Mass Force -	None		
-Wall Lubrication For	ce - None		
-Turbulent Dispersion	Force		
Option	Lopez de Bertoda 👻		
Dispersion Coeff.	0.3		
Turbulence Transfer		-8	
Option	Sato Enhanced Eddy Vi: 👻		

Obr. 13.5 Definice morfologie materiálů, a turbulentních modelů

Fluid Pairs (Párové dvojice tekutin)

Fluid Pairs	– zde je definován seznam všech párových dvojic, které v modelu existují. Náš model obsahuje pouze vodu a vzduch, proto je párová dvojice pouze jedna. Počet párových dvojic narůstá s počtem látek (pokud máme čtyři látky A, B, C a D, pak vzniká celkem 6 párových dvojic AB, AC, AD, BC, BD a CD), a u všech těchto dvojic je nutné definovat parametry v závislosti na morfologii obou látek.
Surface Tension C	– zde je možné definovat povrchové napětí a zahrnout silové efekty na fázovém rozhraní mezi látkami. Povrchové napětí voda - vzduch je $\sigma = 0.072 \text{ N/m}.$
Interphase Transfer	– zde se definuje mezifázový transport. Pro tuto položku ponecháme standardní volbu <i>Particle Model</i> (definuje se zde např. vypařování vody do vzduchové bublinky).
Momentum Transfer	– zde se definují mezifázové síly, zejména odporový součinitel (<i>Drag Forces</i>). Zvolíme výpočet tahových součinitelů dle autorů <i>Schiler-Naumann</i> .
Non-drag forces	– zde je možné definovat ostatní součinitele, které ovlivňující vzájemné silové působení látek. Zde budeme definovat pouze koeficient disperzní síly <i>Turbulent Dispersion Force</i> . Zvolíme definici dle autora <i>Lopez de</i> <i>Bertodano</i> a hodnota bude 0.3. Ostatní položky ponecháme s volbou None.
Turbulence Transfer	 zde definujeme transport turbulence mezi jednotlivými látkami. Ponecháme zde standardní volbu Sato Enhanced Eddy Viscosity.
Mass Transfer	 – zde definujeme transport hmoty mezi jednotlivými látkami (definuje se např. vypařování vody do vzduchové bublinky). Tuto problematiku neřešíme, proto ponecháme volbu <i>None</i>.

Okrajové podmínky budeme definovat standardním způsobem dle následující tabulky. U okrajových podmínek se ale u multifázového modelu vyskytuje další položka *Fluid Values*. Tato položka slouží k definování objemového zlomku jednotlivých tekutin na vstupu. Dle našeho zadání proudí vstupem pouze voda, proto je tedy u vody 1 (100%) a u vzduchu 0 viz Obr. 13.6

Okrajová podmínka Insert Boundary	Základní na Basic Sei	astavení ttings	Pe 1	odrobné nastavení Boundary Details	
Jméno Name ²⁾	Typ podmínky Boundary Type	Umístění <i>Location</i>			
			R Norr	ychlost nal Speed	8 m/s
			Turbulence	Int. Turbulence	0.05
			Inensity	Intensity	(5%)
Inlet	Inlet	INLET	and Length Scale	Délkové měřítko <i>Eddy Len. Scale</i>	0.3 m
			Voda Water	Obj. zlomek Vol. Fraction	1
			Vzduch Air at 25°C	Obj. zlomek Vol. Fraction	0
Outlet	Outlet	OUTLET	Stat Avr. St	tický tlak at. Pressure	0Pa

Tab. 13.1 Tabulka okrajových podmínek pro multifázový mode
--

Podmínku stěny *Fluid Default* není nutné editovat, protože standardní nastavení splňuje zadání příkladu. Stěna je hladká a tekutina na ní ulpívá.

Basic Settings Bo	oundary Details Fluid Yalues Sources	Basic Settings Boundary Details Fluid Values Source
Flow Regime		Boundary Conditions
Option	Subsonic 🗸	Air
Mass And Momentu	m	Water
Option	Normal Speed 👻	
Normal Speed	8 [m s^-1]	Air
Turbulence		Volume Fraction
Option	Intensity and Length Scale	Option Value
ractional Intensity	0.05	Volume Fraction 0 VS
Eddy Length Scale	0.3 m -	
tady conger ocale		Outline Boundary: Inlet
		Details of Inlet in Fluid in Flow Analysis 1
		Basic Settings Boundary Details Fluid Values Source
		Boundary Conditions
		Air Water
		Water
		Water
		Water Volume Fraction Option Value

Modelování multifázového proudění voda-vzduch

Obr. 13.6 Definice okrajové podmínky Inlet

Dle zadání se má vzduch do vody injektovat tryskou s geometricky zanedbatelnými rozměry (vzhledem k rozměrům oblasti), proto tedy využijeme k definici zdroje vzduchu zdrojový bod. Ten vytvoříme pomocí ikony 2. Zdrojový bod libovolně pojmenujeme (např. standardní název *Source Point 1*). Zadáme tři souřadnice X, Y, Z, hmotnostní tok vzduchu a rychlost vzduchu, který z bodu vystupuje. Dle zadání Obr. 13.1 a zvoleného souřadného systému sítě je bod geometricky definován souřadnicemi (-0.9, 0.35, 0.3). Ve zdrojovém bodě je možné definovat zdroj základních počítaných veličin, ty jsou závislé na volbě turbulentního modelu. V našem případě bod definuje zdroj vzduchu, proto tedy zvolíme vzduch v okně *Fluid Sources*. Zaškrtneme položku *Air* a definujeme hmotnostní tok bublinek vzduchu 0.0025 kg.s⁻¹ a složky rychlosti (5,0,0), viz Obr. 13.7. Jelikož je vzduch definován jako dispergované médium, je nutné definovat jak hmotnostní tok tak i rychlost.



Modelování multifázového proudění voda-vzduch

Obr. 13.7 Definování zdrojového bodu

□ Inicializace a nastavení řešiče

Úlohu standardně inicializujeme, přičemž všechny položky je možné ponechat v nastavení *Automatic*. Při inicializaci je vidět, že nastavení výchozích hodnot se provádí separátně pro každou tekutinu. Tlak je u obou tekutin stejný, proto se definuje samostatně, ale rychlost a turbulentní parametry je možné definovat separátně. Pro urychlení konvergence je vhodné inicializovat rychlost vody u=8 [m/s], rychlost vzduchu u=0 [m/s], a turbulentní parametry podle okrajové podmínky *Inlet*. Hmotnostní zlomek vody 1 a hmotnostní zlomek vzduchu 0. Volbu potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*.

Po provedení inicializace ještě nastavíme parametry řešiče. U tohoto jednoduchého příkladu budeme měnit pouze počet iterací na 1000 a ostatní volby ponecháme. Nastavení potvrdíme *Apply* a *Close*, anebo *OK*. Před ukončením *CFX-Pre* ještě vyexportujeme soubor *.*ccl* s kompletním nastavením (vybereme všechny položky stromu simulace) pomocí ikony . Soubor vyexportujeme do pracovního adresáře *C:/Work/Priklad7* pod jménem *Schod.ccl*. Tento soubor následně použijeme při definici druhé simulace, která bude zahrnovat vliv gravitace. Program *CFX-Pre* nyní ukončíme.

	Global Settings Flui Coord Frame Initial Conditions Static Pressure Option Relative Pressure	d Settings Automatic v	vith Value		
tline Initialisation	ition in Flow Analysis 1	×	Outline Initialisation Details of Global Initialisat	ion in Flow Analysis 1	
lobal Settings Fluid Fluid Specific Initialisatio Air Wate	Settings		Fluid Specific Initialisation		
Air Initial Conditions Velocity Type	Cartesian 🗸		Water Initial Conditions Velocity Type	Cartesian -	
Cartesian Velocity C Option U V	Automatic with Value 0 [m s^-1] 0 [m s^-1]		Option U V	Automatic with Value 4 [m s^-1] 0 [m s^-1]	
W Volume Fraction	0 [m s^-1]	-8-	W Turbulence	0 [m s^-1]	
Volume Fraction			Practional Intensity Option Value	Automatic with Va	
			Eddy Length Scale Option Value	Automatic with Va 👻	
			Volume Fraction Option Volume Fraction	Automatic with Value 👻	

Obr. 13.8 Inicializace modelu

_

Outline Solver Co	ntrol					
etails of Solver Cont	rol in Flow Analysis 1					
Basic Settings Ed	quation Class Settings	Advanced Opt	ions			
Advection Scheme						
Option	High Resolution	•]			
Turbulence Numeric	s		Ξ			
Option	First Order	•				
Convergence Contr	ol	Ŧ				
Min. Iterations	1	i]			
Max. Iterations	1000]			
-Fluid Timescale Cor	ntrol					
Timescale Control	Auto Timescale	•				
Length Scale Option	Conservative	-				
Timescale Factor	1.0					
Convergence Criter	ia					
Residual Type	RMS	•]			
Residual Target	1.E-4]			
Conservation	Target		Đ			
Elapsed Wall Cl	ock Time Control		Ŧ			
Interrupt Contr	ol		Ŧ			

Obr. 13.9 Inicializace modelu

Definice simulace se zahrnutím gravitace

Nyní spustíme *CFX-Pre* u druhé simulace, které bude zahrnovat také vliv gravitace. Již nám dobře známým postupem nejprve vymažeme defaultně vytvořenou oblast *Default Domain* a následně importujeme soubor *Schod.ccl* z pracovního adresáře *C:/Work/Priklad7*. Tím vytvoříme identickou kopii předchozí simulace. Tu nyní doplníme o vliv gravitace. Dvojklikem na doménu Fluid ve stromě simulace zobrazíme základní nastavení *Basic Stettings*. U položky *Buoynacy* změníme volbu z *Not Buoyant* na *Buoyant* a definujeme vektor tíhového zrychlení je g = (0, -9.81, 0) [m/s²]. Referenční hustotu definujte $\rho_{ref} = 997$ kg/m³. Definicí referenční hustoty se dá ovlivnit vliv gravitace na jednotlivé tekutiny. Vzhledem k tomu, že voda je řádově těžší než vzduch, budou vztlakové síly působící na vodu zanedbatelné malé. Naopak vzduch bude silně nadlehčován, což odpovídá vlastní zkušenosti. Referenční hustota se většinou definuje podle hustoty látky, která je v simulaci zastoupena největším poddílem, v našem případě voda, proto tedy 997 kg/m³. Pokud do simulace s bublinkami, zahrnujeme také gravitaci, je vhodné změnit výpočet odporového součinitele v záložce *Fluid Pair Models* z původní definice *Schiller-Naumann* na definici dle autora *Grace*, která zahrnuje také vliv vztlakových členů (gravitace).

Program *CFX-Pre* nyní ukončíme a spustíme automatické řešení ve *Workbench* prostřednictvím tlačítka **Update Project**. Následně obě úlohy iteračně vyřešíme, úlohy se řeší postupně, nejprve se vyřeší první simulace, a po uložení výsledkového souboru se automaticky spustí řešení druhé. Během řešení je možno sledovat běh reziduálů. V položce *Momentum and Mass* si můžeme povšimnou, že obsahuje celkem sedm křivek, jedna pro tlak, tří složky pro rychlost vody a tři složky pro rychlost vzduchu. Také doba řešení se vzhledem k předchozím příkladům značně prodlouží, protože se zvýšil počet řešených rovnic.

utline Domain: Fluid ails of Fluid in Flow Au	alysis 1		Outline Domain: Fl etails of Fluid in Flow	luid Analysis 1	
Basic Settings Fluid	Models Fluid Specific Models	s Fluir	Fluid Models	luid Specific Models	Fluid Pair Models
Air Water			Fluid Pair Air Water		
Water					
Option	Material Library 👻		Air Water		
Material	Water 👻		Surface Tensi	on Coefficient	Ξ
Morphology			Surf. Tension Coef	ff. 0.072 [N m^-1]
Option	Continuous Fluid 🚽		-Interphase Transf	fer	Ξ
I Minimum Volun	ne Fraction	• E	Option	Particle Model	•
Domain Models				ume Fraction for Area	Density
Pressure			-Momentum Transf	fer	Ξ
Reference Pressure	1 [atm]		Drag Force		
Buoyancy			Option	Grace	-
Option	Buoyant 👻	•	C Volume Fra	ction Correction Expo	nent 🛛 🛨
Gravity X Dirn.	0 [m s^-2]		Non-drag forces	I	
Gravity Y Dirn.	-9.81 [m s^-2]		Lift Force - Nor	ne	ŧ
Gravity Z Dirn.	0 [m s^-2]		-Virtual Mass Fo	orce - None	
Buoy. Ref. Density	997 kg m^-3 👻			n Force - None ersion Force - Lonez d	le Bertodano (Ŧ
Ref. Location					
Option	Automatic 🗸		- Iurbulence Transf	er .	
Domain Motion			Option	Sato Enhanced	Eddy VI: 👻
Option	Stationary		-Mass Transfer		
			Option	None	-

Modelování multifázového proudění voda-vzduch

Obr. 13.10 Zobrazení změn u řešení se zahrnutím gravitace.



Animaci procesu definice a řešení obou simulací si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad7\ soubor Priklad7_Video2.exe

13.2ANALÝZA VÝSLEDKŮ MULTIFÁZOVÉ SIMULACE



Čas ke studiu: 0.5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

• vytvořit izoplochu pro libovolnou veličinu.



Analýza výsledků multifázové simulace

U první simulace provedeme celý proces vyhodnocení a následně vyhodnocovací soubor *.cst z první simulace načteme do druhé, abychom nemuseli celý postup provádět znovu. Definujeme si vyhodnocovací rovinu (XY, Z = 0.3) a na ní zobrazíme pole rychlosti, tlaku a turbulentní kinetické energie. Tím, že jsou řešeny obě tekutiny pomocí Eulerova modelu odděleně, je možné si vyobrazit všechny parametry jak pro vodu, tak pro vzduch nezávisle. Dále vytvoříme profil koncentrace vzduchu na třech přímkách definovaných v tabulce.

Imáno	Bod 1			Bod 2 Point 2			Počet
Name	Point 1		vzorků				
nume	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Samples
Line 1	0.5	0	0.3	0.5	0.5	0.3	100
Line 2	2	0	0.3	2	0.5	0.3	100
Line 3	3.5	0	0.3	3.5	0.5	0.3	100

Tab. 13.2 Tabulka okrajových podmínek pro pevnou látku



Obr. 13.11 Zobrazení střední rychlosti vody



Obr. 13.12 Zobrazení objemového zlomku vzduchu



Obr. 13.13 Zobrazení objemového zlomku vzduchu na přímkách 1-3

Dále si vyhodnotíme prostorově objemový zlomek bublinek ve výpočtové oblasti. Toto vyhodnocení umožňuje vytvořit obálku, (3D plochu), které ohraničuje oblast, ve které je objemový zlomek větší než hodnota, kterou specifikujeme. Tato vyhodnocovací entita se nazývá *Isosurface* a lze ji využít pro libovolnou veličinu, která je běžně řešena. Aby byla izoplocha relativně dobře patrná, je ještě vhodné ve většině případů zobrazit také pevné stěny. Ve stromu analýzy výsledků zaškrtneme zobrazení defaultní okrajové podmínky (*Fluid Default*) **Fluid Default**, která reprezentuje všechny pevné stěny. Standardně jsou všechny entity obarvené modrou barvou a jsou neprůhledné. To je ale pro nás nevhodné, protože nevidíme dovnitř výpočtové oblasti. Proto tuto položku upravíme, tak aby stěny byly z vnějšího pohledu průhledné. V panelu zobrazení je tedy možné definovat následující položky Barva (*Colour*).

Mode	 zde je definována barva okrajové podmínky. Existují dvě možnosti Varible a Constant. První značí, že položka bude obarvena fyzikální veličinou. Druhá znamená, že položka bude obarvena jednolitě. Ponecháme tedy volbu Constant.
Colour	 – zde je ukázka barvy, klikáním na tuto plochu se bude barva měnit. V základním seznamu je ca 8 barev. Pokud to uživateli nepostačuje, je možné
	tlačítkem zobrazit plnou paletu. V toto případě je použita šedá barva ze základní palety
Vykreslení (Render)	
Transparency	 zde je možné definovat průhlednost stěny. 0 absolutně neprůhledná, 1 zcela průhledná (neviditelná). Stěnu necháme neprůhlednou tedy ponecháme 0.
Draw Mode	 – zde je možné nastavit kvalitu zobrazení, hrubé nebo vyhlazené zobrazení. Ponecháme položku Smooth Shading ti vyhlazené stínování
Face Culing	– zde je možné nastavit typ zobrazení. Existují tři typy zobrazení. No Culing tedy bez úpravy zobrazení. Front Faces to znamená, že budou vidět pouze stěny, které vidíme z vnitřní strany (směr, který sousedí s vnitřním objemem) Plochy které vidíme z vnějšku, jsou průhledné. Back Faces je opačné zobrazení. z vnitřku plochy nevidíme, z vnějšku ano. Vybereme položku Front Faces

Nastavení zobrazení potvrdíme tlačítkem Apply. postup je zobrazen na Obr. 13.15

Details of Fluid Default	Details of Fluid Default
Colour Render View	Colour Render View
Mode Constant 👻	Show Faces
Colour	Transparency 0.0
45	Draw Mode Smooth Shading 👻
	Face Culling Front Faces
	☑ Lighting ☑ Specular
	Show Mesh Lines
	Apply Texture
Other Section School Image: Sectio	
Apply Reset Defaults 30 Viewer Toble	r Weiser Chart Viewer Comment Viewer Report Viewer

Obr. 13.14 Zobrazení stěn výpočtové oblasti

Po zobrazení stěn můžeme přistoupit k definici izoplochy. Izoplochu vytvoříme prostřednictvím tlačítka $\textcircled{O} \ Location \checkmark$ a následně volbou *Isosurface*. pojmenování můžeme ponechat v defaultním tvaru *Isosurface 1* a potvrdíme *OK*. V panelu zobrazení je tedy možné definovat následující položky

Geometrie (Geometry)	
Domains	 – zde definujeme, zda se má izoplocha vykreslit ve všech doménách nebo pouze v některých. V tomto příkladě existuje pouze jedna doména proto nebudeme tuto položku měnit.
Variable	 zde vybereme veličinu, která bude definovat izoplochu. V našem případě to bude objemový zlomek vzduchu <i>Air Volume Fraction</i>. Vyhodnotíme tak "mrak" bublin ve vodě.
Value	– zde stanovíme hodnotu veličiny, která bude definovat isoplochu. Nastavíme hodnotu 0.002 tj. 0.2%. Námi vytvořená izoplocha tedy bude ohraničovat oblast, uvnitř které je objemový zlomek vzduchu $\geq 0.2\%$.
Barva (Colour)	
Mode	– zde je definováno, jak bude <i>izoplocha</i> obarvena. Existují dvě možnosti <i>Varible</i> a <i>Constant</i> . První značí, že položka bude obarvena fyzikální veličinou. Druhá znamená, že položka bude obarvena jednolitě. Ponecháme tedy volbu <i>Constant</i> .
Colour	 – zde je ukázka barvy, klikáním na tuto plochu se bude barva měnit. V základním seznamu je ca 8 barev. Pokud to uživateli nepostačuje je možné tlačítkem zobrazit plnou paletu. V toto případě je použita červená barva ze základní palety

Vykreslení (Render)

Transparency, Draw Mode, Face Culing- tyto položky mají stejnou funkci jako u zobrazení okrajové podmínky, na předchozí straně.



Obr. 13.15 Postup definice isoplochy definované objemovým zlomkem vzduchu





Po vytvoření isoplochy uložíme vyhodnocovací soubor a ukončíme *CFD-Post* u první simulace. Následně spustíme CFD-Post u druhé simulace (s gravitací) a načteme soubor *.cst z první simulace. Poté si můžeme pouze prohlédnout výsledky, protože entity a obrázky již nemusíme definovat.

Wa Co	ater.Velocity Intour 1	
	8.221e+000	
	7.399e+000	Noncommercial use only
	6.577e+000	
	5.755e+000	
	4.933e+000	
	4.110e+000	
	3.288e+000	
	2.466e+000	
	1.644e+000 8.221e-001	
_	0.000e+000	
m	i s^-1]	

Obr. 13.17 Zobrazení střední rychlosti vody, se zahrnutím gravitace ve výpočtu



Obr. 13.18 Zobrazení objemového zlomku vzduchu, se zahrnutím gravitace ve výpočtu



Obr. 13.19 Zobrazení objemového zlomku vzduchu na přímkách 1-3 se zahrnutím gravitace ve výpočtu



Obr. 13.20 Zobrazení "mraku" bublin, který je reprezentován izoplochou objemového zlomku vzduchu se zahrnutím gravitace ve výpočtu

Srovnáním výsledků obou modelů je zřejmý zásadní vliv gravitace na rozložení bublinek ve vodě. U výpočtu s gravitací se bublinky drží u horní stěny a také se rozptylují po šířce. Naopak u výpočtu bez gravitace se bublinky drží uvnitř výpočtové oblast, a dokonce se neparně hromadí v oblasti zavíření za náhlým rozšířením, což je vzhledem k nízké rychlosti nepravděpodobné.

ANIMACE

Animaci procesu analýzy výsledků obou simulací si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad7\ soubor Priklad7_Video3.exe

SHRNUTÍ POJMŮ Č. 13

Multifázová simulace je simulace, která umožňuje řešit tok dvou a více tekutin (kapalin, plynů, par, bublinek, kapiček atd.), které mají řádově stejný vliv na proudové pole.

Fluidní pár definuje vzájemný vztah dvou látek (např. voda vzduch), pomocí základních fyzikálních veličiny (např. povrchové napětí)

Disperzní síla definuje fyzikálně disperzi, tj. reprezentuje neuspořádaný pohyb částic (bublinek, kapiček, pevných částic) v základní tekutině.

Mezifázový transport specifikuje přenos hmoty z jedné fáze do druhé, např. simulace voda-vodní pára, voda se může vypařovat a naopak pára může kondenzovat



OTÁZKY Č. 13

- 1. Jaké úlohy je možné řešit multifázovou simulací, vyjmenujte několik příkladů?
- 2. Jaké základní fyzikální parametry definují soustavu voda vzduch?
- 3. Jak je omezen počet tekutin v multifázové simulaci?
- 4. Jak se projeví gravitace ve výpočtu simulace voda-vzduchové bublinky?
- 5. Jak určíte hodnotu referenční hustoty u multifázové simulace s gravitací?
- 6. Jak se projeví můltifázová simulace na rychlosti výpočtu? Porovnejte počet řešených rovnic u jednoduché simulace se vzduchem a multifázové v systému voda vzduchové bublinky.
- 7. K čemu je možné využít isoplochu při analýze výsledků? Zkuste vyjmenovat nějaké příklady

14 MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V HYDRAULICKÉM VENTILU-DESIGNOVÁ STUDIE

14.1DEFINICE PROJEKTU



Čas ke studiu: 1hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- importovat geometrii z externího CAD programu.
- vytvořit geometrii obsahující designové parametry.



Upozornění

Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně složitý problém, bude proveden pouze stručný popis, protože detailní popis by byl neúměrné dlouhý. Pro lepší pochopení je nutná znalost základnách optimalizačních schémat, poměrně velká zkušenost při tvorbě a zjednodušování geometrie v *Design Modeleru* a znalostí z oblasti tekutinových mechanizmů. Tento příklad si klade za cíl pouze demonstrovat všechny možnosti při tvorbě simulací v programu *Workbench* a nastínit složitost a komplexnost reálných praktických úloh.

D Popis úlohy

V této závěreční kapitole si ukážeme možnosti programu *Workbench* při řešení poměrně složíte úlohy, která se zabývá modelováním prouděním v hydraulickém ventilu. Našim úkolem bude pro daný hydraulický ventil stanovit charakteristiku $Q = f(\varphi)$, $\Delta p = f(\varphi)$, a komplexní charakteristiku (3D graf) $Q = f(\Delta p, \varphi)$, kde φ je otevření ventilu. 3D parametrický model ventilu je vytvořen v programu *ProEngineer WildFire*. (Model může být připraven i v jiných 3D kreslících programech, *ProEngineer WildFire* je pouze volba autora.)

Hydraulický ventil, který je v této úloze požit pro demostrativní úlohu, je používán pro regulaci tlaku. Řez ventilem je znázorněn na Obr. 14.1. Jedna se o vestavný ventil, tzv. "Cartridge", ventil tedy nemá vlastní pouzdro a je montován přímo do zařízení, nejčastěji do hydraulické kostky. Schematicky je možný tvar vestavného otvoru pro tento ventil naznačen na Obr. 14.1, viz poz. 3. (čerchovaná čára). Vstupní a výstupní část může být odlišná s ohledem na aktuální řešení vnitřního vrtání hydraulické kostky. Jediným omezením je průměr pouzdra poz. 2., vnější závit pole poz. 4. a délky těchto funkčních ploch. Ventil je dvoustupňový a skládá se z hlavní (výkonové) části a řídící části. Výkonová část je tvořena šoupátkem poz. 1 a pouzdrem poz. 2. V pouzdru je šest otvorů "kanálků" o průměru 3,8 mm, které jsou překrývány šoupátkem. Řídící část je tvořena kuželkou poz. 5., která reguluje rychlost přestavování šoupátka. Kulička a pružina v levé části nákresu slouží pro nastavení předpětí kuželky a tedy pro nastavení tlaku. V Obr. 14.1 je schematicky naznačeno proudění kapaliny, červenou barvou je označena vstupující kapalina o vysokém tlaku, fialovou oblast škrcení a modrou barvou odcházející kapalina o nízkém tlaku. V tomto příkladě se zaměříme pouze na výkonovou část, takže oblast s kuželkou nebude ve výpočtu zahrnuta. Výpočet bude tedy zahrnovat pouze šoupátko a pouzdro, jež reprezentují výkonovou část, a dále komoru, do které je ventil zašroubován, a která reprezentuje vnější stěny oblasti.



Obr. 14.1 Ventil PCV: 1. Šoupátko, 2. Pouzdro, 3. Komora, 4. Pole, 5. Kuželka

Tab. 14.1 Zakladni pa	rametry ulony
Re číslo	$Re \approx 2000$
Tlak na vstupu	$p_{vstup} = 4-10 \text{ MPa}$
Tlak v trysce	p = 3 MPa
Tlak na výstupu	$p_{vystup} = 0$ Pa
Otevření ventilu	$\varphi = 0.3-0.6 \text{ mm}$
Proudící tekutina	Hydraulický olej
	$\eta = 0.012$ Pa.s
Olei	$\lambda = 1.6 \text{ W/(m.K)}$
Olej	$c_p = 1600 \text{ J/(kg. K)}$
	$\rho = 880 \text{ kg/m}^3$

Tab. 14.1 Základní	parametry úlohy	/
--------------------	-----------------	---

Vytvoření geometrie

V tomto příkladě budeme definovat zcela nový projekt. Vytvoříme nový pracovní adresář C:/Work/Priklad8 (nebo jiný podle uvážení uživatele). Do pracovního adresáře nakopírujeme geometrii ventilu ve formátu *.iges, která je k dispozici v příloze pod jménem assembly_iges.igs. Spustíme program Workbench a pomocí ikony 💹 uložíme nepojmenovaný projekt jako Priklad8.wbdb do nově vytvořeného adresáře C:/Work/Priklad8. Tím jsme vytvořili prázdný projekt. V projektu vložíme CFD simulaci S Fluid Flow (CFX) a pojmenujeme ji Ventil. Tato simulace nemá definovánu žádnou položku. Levým tlačítkem vybereme položku 🥯 Geometry a levým tlačítkem vyvoláme kontextové menu, ve kterém zvolíme příkaz Import Geometry, a z pracovního adresáře vybereme soubor assembly iges.igs. Geometrie je tak importována do projektu. To je signalizováno tak, že místo původního symbolu otazníku je nyní u položky zelené zatržítko a změnila se ikona položky 🞯 Geometry .



Obr. 14.2 Zobrazení procesu importu externí geometrie.

Nyní, vzhledem k tomu, že geometrie obsahuje entity, které nejsou ve výpočtu relevantní, je nutné dále geometrii upravit, zjednodušit a modifikovat tak, aby byla použitelná pro CFD simulaci. Dvojklikem na položku 🖬 Geometry se spustí program *Design Modeler* s importovanou geometrií. Po spuštění programu je nutné vybrat jednotky, ve kterých se bude dále kreslit. (vzhledem k rozměrům a zvyklostem zvolíme *mm*). Příkaz import je ještě nutné potvrdit tlačítkem 3° Generate. V grafickém pracovním okně by se nyní měla zobrazit geometrie. Pro další úpravy si všechny entity zamrazíme příkazem *Tools* \rightarrow *Freeze* Freeze. Pro lepší práci a orientaci v modelu si vytvoříme dvě základní entity. Objem reprezentující blok, do kterého je ventil zašroubován, přejmenujeme na *Block*, a ostatní objemy sloučíme do páru, který pojmenujeme *Valve*.

Vzhledem ke složitosti úpravy geometrii si již pouze nastíníme postup úpravy a zaměříme se pouze na důležité části.

- 1) Nejprve posuneme šoupátko příkazem *Create* \rightarrow *Body Operation* Poisson s příkazem *Move*, tak aby byl ventil plně uzavřen. Otevření je tedy 0 mm, čímž je ventil defacto v referenční poloze.
- 2) Vytvoříme rovinu, která bude umístěna na čele šoupátka, ve stromu Plane6
- 3) Vytvoříme další rovinu *Plane 7*, která je vztažená k rovině *Plane 6*, a nastavíme parametr posunutí roviny ve směru osy Z *Offset Z*. Hodnotu posunutí nastavíme na hodnotu 0.5 mm. Zároveň také zaškrtneme políčko v levé části položky. Tím vytvoříme v projektu nový *Design Parameter*, který pojmenujeme *Lift* (zdvih) a volbu potvrdíme *OK*. Po potvrzení se u této položky objeví vlevo modré písmeno **D**. Tento parametr bude reprezentovat otevření ventilu φ viz Obr. 14.4, takže jeho změnou v rozmezí 0-0.6 mm můžeme nastavit otevření ventilu. Jinými slovy Design parametr není nic jiného než pojmenovaná kóta. Využití tohoto parametru bude zřejmé až v následujících kapitolách.

D 4 11 4 01 7			A: Ventil -	DesignModeler	r and a second second	
Details of Plane/		^	Create a n	ew Design Para	meter for dimension	n reference
Plane	Plane7		Plane7 FD	ew Design Fara 17	meter for dimension	inteletence
Туре	From Plane					
Base Plane	Plane6					
Transform 1 (RMB)	Offset Z		Paramete	er Name: Lift		
D1, Value 1	0,5					
Transform 2 (RMB)	None					
Reverse Normal/Z-Axis?	No .			OK	Cancel	
Flip XY-Axes?	No					1
Export Coordinate System?	No	-				
					↓ I	
Zaškrtnout bílé políd	čko		Details View	ane7	•	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of Plane	ane7	Plane7	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of Pl Plane Type	ane7	Plane7 From Plane	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of Pl Plane Type Base Plane	ane7	Plane7 From Plane Plane6	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of Pl Plane Type Base Plane Transform 1	ane7	Plane7 From Plane Plane6 Offset Z	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of Pl Plane Type Base Plane Transform 1 D FD1, Valu	ane7 (RMB)	Plane7 From Plane Plane6 Offset Z 0,5 mm	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of Plane Type Base Plane Transform 1 D FD1, Vale Transform 2	ane7 (RMB) Je 1 (RMB)	Plane7 From Plane Plane6 Offset Z 0,5 mm None	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of P Plane Type Base Plane Transform 1 D FD1, Vale Transform 2 Reverse Nor	ane7 (RMB) Je 1 (RMB) mal/Z-Axis?	Plane7 From Plane Plane6 Offset Z 0,5 mm None None	
Zaškrtnout bílé políč	čko		Details View Details of P Plane Type Base Plane Transform 1 D FD1, Vale Transform 2 Reverse Nor Flip XY-Axes	ane7 (RMB) Je 1 (RMB) mal/Z-Axis? ?	Plane7 From Plane Plane6 Offset Z 0,5 mm None No _ No	

Obr. 14.3 Definice designového parametru



Obr. 14.4 Naznačení tvaru ventilu v oblasti škrcení a označení zdvihu

- 4) Nyní použijeme rovinu *Plane 6* a 7 v příkazu *Create* → *Body Operation* Body Operation, s definicí *Move*. Tímto příklazem se reálně vykoná pohyb šoupátka ve směru osy Z.
- 5) Po provedení definice parametru jej není nutné hledat ve stromu geometrii, ale lze je zobrazit pomocí ikony parameters. Po kliknutí na tuto ikonu se v dolní části objeví bílé grafické okno s parametrem (uživatel může definovat libovolný počet parametrů). Okno tedy obsahuje text Lift = 0.50000000. Zde stačí přepsat číselnou hodnotu a následně aktualizovat geometrii příkazem generate. To je poměrně velká výhoda, protože u složité geometrie nemusí uživatel hledat ve stromu položku, která změní parametr, jehož hodnotu chce změnit. Okno s parametry je možné skrýt pomocí symbolu připínáčku v pravé horní části P, takže si nezmenšíme aktivní část grafického okna o okno s parametry. Okno můžeme kdykoli zobrazit pomocí ikony proteci se proteci je vhodné opět nastavit na 0.5 vzhledem k následujícímu postupu. Proces je zobrazen na Obr. 14.3
- 6) Nyní potlačíme zobrazení partu Valve. Pomocí příkazu *Tools→ Fill* Fill vyplníme dutinu. Tím vytvoříme základ objemu, který bude reprezentovat olej, tedy výpočtovou oblast CFD simulace. Po vytvoření tohoto objemu jej proto pojmenujeme *Fluid*. V příkazu *Fill* vybereme všechny vnitřní plochy v objemu *Block*. (při vybírání je vhodné přepnout vybírací režim a typ rámeček)
- 7) Pomocí booleovské operace Create →Boolean Boolean odečteme od objemu Fluid part Valve. Tím vznikne v objemu Fluid dutina, které reprezentuje ventil. Tímto jme defacto vytvořili objem, ve kterém se u reálného ventilu vyskytuje olej, zároveň jsme tuto oblast ukončili několik mm za šoupátkem, což zcela odpovídá zadání.
- 8) Bohužel při předchozí operaci vznikly i objemy, které reprezentují dutiny pro těsnění, funkční vůle, závity apod. Takže Objem Fluid je nutné ještě zjednodušit a tyto nepodstatné části z geometrie odstranit. Tento postup je velice zdlouhavý a obsahuje celou řadu kroků, a ilustruje reálné úpravy, které musí většinou uživatel provést, pokud obdrží reálnou geometrii z programu CAD.



Obr. 14.5 Modifikace designového parametru.

Po všech úpravách se geometrie zjednoduší tak, že je použitelná v procesu síťování. Výsledek celého procesu zjednodušení geometrie je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 14.6 Modifikace designového parametru.

Po provedení všech úprav geometrii uložíme a ukončíme program *Design Modeler*. Za povšimnutí stojí také modifikace CFD simulace v projektu *Workbench*. Tím, že jsme do geometrie umístili Designový parametr, se rozšířila simulace o další položku *Parameters*.

	•		А			
	1	C	Fluid Flow (CFX)			
	2	00	Geometry	× .		
	3	۲	Mesh	2		
	4	٢	Setup	? 🖌		
	5		Solution	? 🖌		
	6	۲	Results	? 🖌		
>	7	φ	Parameters			
			Ventil			
pə F	Para	mete	er Set			

Obr. 14.7 Zobrazení CFD simulace s designovými paramertry.



Animaci procesu tvorby geometrie si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad8\ soubor Priklad8_Video1.exe

Vytvoření sítě

Vzhledem ke složitosti geometrii použijeme pro tvorbu sítě čtyřstěny. Samotné proudění ve ventilu se vyznačuje vysokými smykovými silami a gradienty v blízkosti stěn, proto vytvoříme také mezní vrstvu. Proces síťování zahájíme standardním způsobem, tj. editací položky Mesh. Po spuštění programu *Meshing* nebudeme vytvářet síť přímo v tomto programu, ale ukážeme si další nástroj, který je určen pouze pro tvorbu čtyřstěnné sítě a mezní vrstvy. Jedná se o program *CFX-Mesh*. Ten není možné spustit samostatně, ale pouze ze stromu v programu *Meshing*. Tento program je velice jednoduchý a robustní. Spuštění programu je jednoduché ve stromu sítě vybereme položku *Mesh*, levým tlačítkem vyvoláme kontextové menu a zvolíme příkaz *Edit in CFX-Mesh*. Tím je spuštěn program *CFX-Mesh*. Proces síťování i vzhled je obdobný programu *Meshing*.



Obr. 14.8 Zobrazení CFD simulace s designovými parametry.

Program *CFX-Mesh* funguje jako metoda s vlastním grafickým programem. Takže není nutné soubor ukládat atd. i když to program umožňuje.

Proces tvorby sítě si zde popíšeme opět ve stručné formě.

 Vytvoříme pojmenované plochy, které budou reprezentovat Vstup, Výstup a Trysku v šoupátku. Vybereme položku *Regions* Regions , levým tlačítkem vyvoláme kontextové menu a zvolíme příkaz *Insert* →*Composite 2D Region*. Vybereme plochu, která reprezentuje výstup. Volbu potvrdíme tlačítkem *Apply*. Následně se v položce Regions zobrazí nová položka *Composite 2D Region 1*. Vybereme tuto položku, levým tlačítkem vyvoláme kontextové menu a zvolíme příkaz *Rename*. Jméno změníme na *Outlet*.



Obr. 14.9 Postup vytvoření okrajové podmínky Outlet.

2) Stejně postupujeme i u zbylých dvou okrajových podmínek reprezentující vstup *Inlet* a trysku v šoupátku *Nozzle*. viz Obr. 14.10



Obr. 14.10 Umístění okrajové podmínky Inlet a Nozzle

3) V položce *Spacing* definujeme globální parametry sítě u položek *Default Body Spacing* a *Default Face Spacing*. Tyto parametry definují globální nastavení, takže další parametry sítě není možné definovat mimo tyto limity.



Obr. 14.11 Nastavení globálních parametrů sítě

4) Nyní detailně nastavíme parametry sítě pro oblasti, které dominantně ovlivňují proudění. Výpočetní síť zde musí být jemná, tak aby byl výpočet kvalitní. V položce *Spacing* vyvoláme kontextové menu a zvolíme příkaz *Face Spacing*. Vybereme všechny plochy trysky šoupátka (okrajovou podmínku *Nozzle* a povrch přilehlého válce) volbu potvrdíme a nastavíme parametry sítě dle následujícího obrázku. Stejným postupem vybereme všechny plochy jednotlivých kanálků a škrtící hranu šoupátka volbu potvrdíme *Apply* a nastavíme parametry sítě. Postup je zobrazen na Obr. 14.12.



Obr. 14.12 Nastavení parametrů sítě pro trysku a kanálky

5) Podobným způsobem nastavíme parametry sítě u samotných škrtících hran. V položce *Spacing* zvolíme příkaz *Edge Spacing*. Vybereme všechny škrtící hrany a definujeme parametry sítě dle následujícího obrázku viz Obr. 14.13.



Obr. 14.13 Nastavení parametrů sítě pro škrtící hrany

- 6) Další krok bude spočívat v definici mezní vrstvy. V položce *Mesh* vybereme položku *Inflation* a Vybereme příkaz *Inflated Boundary*. Následně vybereme ze seznamu *Regions* položku *Default 2D Region*. Tím defacto vybereme všechny pevné stěny, tím je mezní vrstva definována v celém ventilu, vyjma vstupních a výstupních okrajových podmínek. Volbu potvrdíme *Apply* a nastavíme parametry mezní vrstvy dle následujícího obrázku viz Obr. 14.14.
- 7) Tím je kompletně definována výpočetní sít. Nyní můžeme spustit příkazem ^[5]Generate Volume Mesh proces objemového síťováni. Tato operace může trvat i několik min v závislosti na CPU a dostupné RAM. Po ukončení procesu se v dolní části zobrazí informace o vygenerované síti. Vygenerovanou sít uložíme příkazem *File → Save* a program CFX-Mesh ukončíme *File → Close CFX-Mesh*. Tímto příkazem se vrátíme do programu Meshing. Zde stiskneme tlačítko ^[1]Update a po vykonání příkazu síť uložíme příkazem *File→ Save* a program Meshing ukončíme *File → Close Meshing*.



Obr. 14.14 Nastavení parametrů mezní vrstvy



Animaci procesu tvorby výpočetní sítě si může student zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad8\ soubor Priklad8_Video2.exe

Definice simulace

U CFD simulace použije opět velmi zjednodušený postup popisu definice. Definici zahájíme definicí materiálu, protože kapalina olej není v materiálové databázi.

1) Materiál olej můžeme vytvořit tak, že v databází vybereme materiál vodu *Water* levým tlačítkem a zvolíme příkaz *Duplicate*. Jméno duplikovaného materiálu změníme na *Oil*.



Obr. 14.15 Duplikování a přejmenování matriálu

- E - E

Ξ

Ð

•

Ŧ

2) Nyní editujeme materiál *Oil* a změníme všechny podstatné fyzikální vlastnosti dle následující tabulky

	České pojmenování	Název v CFX	Hodnota
		Nuzev v er A	
	Hustota	Density	ρ = 880 kg/m ³
O1ai	Tepelná kapacita	Specified Heat Capacity	$c_p = 1600 \text{ J/(kg. K)}$
Olej	Dynamická viskozita	Dynamic Viscosity	$\eta = 0.0012$ Pa.s
	Tepelná vodivost	Thermal Conductivity	$\lambda = 1.2 \text{ W/(m.K)}$

Thermodynamic Properties			Transport Properties		
	Equation of State			-IV Dynamic Viscosity	
	Option	Value 👻		Option	Value
	Molar Mass	18.02 [kg kmol^-1]		Dynamic Viscosity	0.0012 [kg m^-1 s^-1]
	Density	880 [kg m^-3]		Thermal Conductiv	vity
	V Specific Heat Capacity		-8-	Option	Value
	Option	Value 🔹		Thermal Conductivity	1.2 [W m^-1 K^-1]
	Specific Heat Capacity	1600 [J kg^-1 K^-1]		Radiation Properties	
	Specific Heat Type	Constant Pressure 🔹		Buoyancy Propertie	S
				Option	Value
				Thermal Expansivity	2.57E-04 [K^-1]

Obr. 14.16 Definování fyzikálních vlastností materiálu Oil

- 3) Vzhledem k malému Reynoldsovu čislu a velkým smykovým napětím v oblasti škrcení použijeme pro řešení model turbulence Shear Stress Transport, který je vhodný právě na tyto aplikace. Úlohu budeme řešit jako izotermickou s teplotu 25°C.
- 4) Okrajové podmínky nastavíme podle následující tabulky.

Okrajová podmínka Insert Boundary	Základní nastavení Basic Settings		Podrobné nastavení Bourn darry Detoila		
Jméno	Typ podmínky	Umístění	Воипаагу	Details	
Name	Boundary Type	Location			
T. 1.4	I.1.(Telat	Totální tlak Total pressure	4 MPa	
Inlet	Inlet	Inlet	Int. Turbulence Intensity	High (Intensity = 10%)	
Outlet	Outlet	Outlet	Statický tlak Avr. Stat. Pressure	0 Pa	
Nozzle	Outlet	Nozzle	Statický tlak Avr. Stat. Pressure	3 MPa	

Tab.	14.3	Tabulka	okrajových	podmínek
------	------	---------	------------	----------

5) Úlohu inicializujeme následujícím postupem, všechny složky rychlosti budou nulové, a tlak nastavíme na hodnotu 2 MPa, což je polovina tlakového spádu dle okrajových podmínek. V nastavení řešiče změníme pouze počet iterací.

Coord Frame		— 🗄 — 🖯	Details of Solver C	ontrol in Flow Analysis	1
Initial Conditions			Basic Settings	Equation Class Settings	Advanced Options
locity Type Cartesian Velocity Co	Cartesian 👻		Advection Scheme Option High Resolution -		
Option	Automatic with Value		Turbulence Num Option	First Order	E
J /	0 [m s^-1]		Convergence Control Min. Iterations 1		
Static Pressure			Max. Iterations 1000 Fluid Timescale Control Timescale Control Auto Timescale		
Relative Pressure	2 [MPa]		Length Scale Op	ption Conservative	•
Option	High Intensity and Eddy Viso 👻		Timescale	scale 🗄	
			Convergence Criteria Residual Type RMS		•
			Residual Target	1.E-4 ion Target	Đ
			Elapsed Wa	Il Clock Time Control	±

Obr. 14.17 Inicializace a nastavení řešiče.

Řešení úlohy a analýza výsledků

Po úplném definování CFD simulace spustíme standardním způsobem řešení. V programu *Workbench* prostřednictvím tlačítka **V update Project**. Po vyřešení úlohy spustíme postprocesor a analyzujeme výsledky. Popis analýzy výsledků provedeme opět ve stručné formě.

- 1) Vytvoříme rovinu ZX, Y=0.02, což je podélná řez ventilem. Tuto rovinu použijeme pro vytvoření kontur statického tlaku, střední rychlosti a vektorů rychlosti.
- 2) Zobrazíme stěny ventilu a nastavíme jejich barvu na šedou, a dále upravíme průhlednost, tak aby bylo vidět "dovnitř" ventilu. Následně vytvoříme proudové čáry pomocí ikony . V položce *Start From* vybereme okrajovou podmínku *Inlet*. pomocí proudových čar si můžeme zobrazit trajektorii částic kapaliny, to je výhodné zejména u prostorově složitého proudění, což je tento případ.
- 3) Cílem této úlohy je stanovení funkce $Q = f(\Delta p, \varphi)$. Hodnotu otevření φ je určena geometrií. Hodnotu tlakového spádu Δp bychom mohli určit z okrajových podmínek. Výsledkem výpočtu je tak hodnota průtoku Q, která je závislá na definované hodnotě φ a zadaných tlakových okrajových podmínkách. Abychom měli výsledky veličin určeny přehledně, vytvoříme si vyhodnocovací vzorce pro průtok Q a tlakový spád Δp . Dále
vytvoříme tabulku, do které umístíme odkazy na vyhodnocovací vzorce. V následující tabulce jsou vztahy pro definici veličin Q a Δp a jejich ekvivalent v CFD-Post.



Tab. 14.4 Tabulka vyhodnocovacích vzorců

Obr. 14.18 Definování vyhodnocovacích vzorců

Tím je dokončena definice poslední položky CFD simulaci v projektu Ventil. Pokud bychom chtěli vyřešit variantu s jiným otevřením či tlakovým spádem, stačí nyní pouze změnit parametr Lift v geometrii, nebo okrajovou podmínku inlet v CFX-Pre, případně obojí. Po změně jakéhokoli parametru se u jednotlivých položek změní ikona ze zeného zatržítka 🗸 na jiný symbol. Pokud chceme nyní vyřešit novou variantu, stačí pomocí ikony ⁷ Update Project</sup> v programu Workbench spustit plné řešení projektu. Všechny kroky se pak provedou automaticky, tak jak jsme je definovali, ve spodní části obrazovky se následně zobrazí Progres Bar, který signalizuje postup řešení a jednotlivé fáze. Uživatel nyní nemusí provádět žádní kroky a pouze čeká na ukončení řešení. posléze si může zobrazit výsledky a odečíst hodnoty O a Δp z tabulky. Tímto manuálním postupem si může uživatel vyřešit libovolné varianty, odstraní se tak úmorná práce při opakování stale stejných kroků, při otevírání jednotlivých programů v položkách simulace. Vyřešení určitého počtu variant je pak možné, např. v programu *Excel* vyhodnotit funkci $Q = f(\Delta p, \varphi)$ a vytvořit požadované grafy a tabulky. V další kapitole si ukážeme jak lze proces řešení několika variant ještě automatizovat, tak aby se řešení všech požadovaných variant provedlo automaticky bez zásahu uživatele.



Animaci procesu definice, řešení a analýzy výsledků CFD simulace si může student zobrazit

- odkazem ANIMACE
- spustit ručně z adresáře Animace/Priklad8/ soubor Priklad8_Video3.exe

14.2DEFINICE PROJEKTU DESIGN EXPROLATION V SIMULACI



Čas ke studiu: 1hodina

Ø

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- modifikovat projekt s využitím vstupních a výstupních parametrů.
- vytvořit designový projekt.
- vytvořit 2D a 3D grafy, jako výsledek designového projektu.



Popis úlohy

Modul *Design Exploration* umožňuje řešit automaticky pomocí implementovaných nástrojů pokročilé analýzy, jako např. citlivostní analýzy, analýzu odezvy, řešení charakteristik atd. V našem případě chceme stanovit základní parametry ventilu, tj. $Q = f(\varphi)$, $Q = f(\rho_{vstup})$, a $Q = f(\rho_{vstup}, \varphi)$. V simulaci je tedy nutné specifikovat důležité parametry a současně specifikovat, zdali se jedná o vstupní nebo výstupní parametr. Ze zadání Tab. 14.1vyplývá, že vstupní proměnný parametr bude 1) otevření ventilu φ a 2) tlak na vstupu p_{vstup} . Výstupní parametr bude 1) průtok Q a 2) tlakový spád

 $\Delta p = p_{vstup} - p_{vystup}$, ten určujeme proto, že tlak na vstupu je definován v okrajové podmínce, jako totální a tlakový spád, tak neodpovídá zcela přesně hodnotám, které jsou zadávány do okrajových podmínek.



Obr. 14.19 Schéma projektu

Naše úloha bude vlastně spočívat ve vyřešení matice série výpočtů s proměnným otevřením φ a proměnným vstupním tlakem p_{vystup} , přičemž výsledkem simulací bude průtok Q a tlakový spád Δp .

Modifikace projektu

Aby bylo možné do projektu smysluplně vložit projekt v programu *Design Exploration*, je nutné v simulaci vytvořit vstupní a výstupní parametry. První parametr jsme již vytvořili v geometrii. Jedná se o parametr *Lift*, tj. otevření ventilu. Parametr v geometrii může být pouze vstupní, proto jej není nutné

nějak definovat. V následujících krocích si stručně vysvětlíme úpravy v jednotlivých položkách simulace.

- 2) Levým tlačítkem vybereme položku ^{● Mesh} a následně pravým vyvoláme kontextové menu a zvolíme příkaz [✓] ^{Update}. Tím se automaticky na pozadí spustí program *Meshing*, načte aktualizovanou geometrii, aktualizuje výpočetní sít a soubor uloží. Program tak není nutné vůbec spouštět, protože nebudeme žádným způsobem měnit parametry sítě.



Obr. 14.20 Automatická aktualizace výpočetní sítě

 Levým tlačítkem vybereme položku setup, vyvoláme pravým tlačítkem kontextové menu, a zvolíme příkaz Refresh. tím bude do simulace načtena aktualizovaná síť viz Obr. 14.21.



Obr. 14.21 Aktualizace sítě v CFD simulaci

4) Aby bylo možné používat tlak, definovaný v okrajové podmínce *Inlet* jako vstupní parametr, je nutné jeho hodnotu definovat pomocí vzorečku *Expresion*. Spustíme tedy *CFX-Pre* a pomocí příkazu Expresion cyvtvoříme nový vzoreček, jehož jméno bude *pinlet*. Vzoreček nebude definován funkcí, ale pouze číselnou hodnotou 4 [*MPa*], což je výchozí hodnota vstupního tlaku. Jakmile potvrdíme definici tlačítkem *Apply*, objeví se vzoreček v seznamu. Nyní vybereme vzoreček levým tlačítkem a vyvoláme kontextové menu. V tomto menu zvolíme příkaz *Use as Workbench Input Parameter*. Tímto příkazem definujeme vzoreček jako vstupní parametr. Také symbol vzorečku se změnil z původního symbolu cymbol šipky

míří k písmenu P). Tento vzoreček pak použijeme v okrajové podmínce pro definici hodnoty totálního tlaku. Simulaci uložíme a program *CFX-Pre* ukončíme.



Obr. 14.22 Definování vstupního tlaku jako parametru v okrajové podmínce

5) Levým tlačítkem vybereme položku Solution, pravým tlačítkem vyvoláme kontextové menu a zvolíme příkaz [≁] Update, tím spustíme iterační řešení simulace. Jelikož jsme tuto položku neresetovali, je k dispozici řešení s otevřením ventilu 0.5mm. V tomto případě se tedy nebude úloha řešit z počátečních podmínek definovaných v inicializaci, ale řešení bude interpolováno na změněnou síť a řešení se tak pouze poopraví. Tím je značně urychlena konvergence, protože v ca 95% řešené oblasti dojde pouze k malé změně.



Obr. 14.23 Aktualizace řešení CFD simulace

6) Po skončení řešení vybereme levým tlačítkem položku Results, pravým vyvoláme kontextové manu a zvolíme příkaz Refresh. Tím bude aktualizován výsledkový soubor. Následně spustíme program CFD-Post a prohlédneme si výsledky. Všechny roviny, obrázky a tabulka již byla definována. Všechny položky se aktualizují na základě nového řešení.



Obr. 14.24 Aktualizace výsledku CFD simulace

7) V CFD-Post přepneme panel na záložku Expresion. Zde by měl být uveden kompletní seznam všech vzorců, které jsou definovány v simulaci. Některé ze vzorců jsou systémové, proto je seznam poněkud obsáhlejší. Nás ale zajímají námi definované vzorce pro objemový průtok VolFlow a tlakový spád deltap. Nejprve vybereme např. vzorec VolFlow levým tlačítkem a následně pravým vyvoláme kontextové menu. Zde zvolíme příkaz Use as Workbench Output Parameter. Tím je vzoreček definován jako výstupní parametr

simulace. Stejným postupem definujeme také vzoreček deltap jako výstupní parametr. U obou vzorečku by se měla změnit ikona z původní 🖾 VolFlow na 🔛 VolFlow. Tím je signalizováno, že vzorce jsou definovány jako výstupní parametry (symbol šipky míří od písmene P). Tím jsou definovány všechny parametry v projektu. Uložíme vyhodnocovací soubor a ukončíme *CFD-Post*.



Obr. 14.25 Definování objemového průtoku a tlakového spádu jako výstupní parametry simulace.

8) V projetu se nyní modifikují symboly u záložky ^{Parameters}. Do položky jak vstupuje tak i vystupuje šípka, což značí že problém obsahuje jak vstupní tak výstupní parametry.



Obr. 14.26 Zobrazení projektu se vstupními a výstupními parametry.

Definování projektu Design Exploration

V této kapitole si velice stručně popíšeme postup při definování položek a kompletní řešení projektu v programu *Design Explotation*.

Po definování všech parametrů můžeme začít definovat rozsah parametrického výpočtu. V programu *Workbench* zobrazíme položku Design Exploration symbolem plus. Vybereme položku Parameter a při stisknutém levém tlačítku ji přesuneme do pracovního okna pod položku Parameter Set, která je s projektem propojena šipkami. Tím se v projektu vytvoří dvě položky nástroje *Design Exploration*. 1) *Design of Experiments*, zde nastavujeme rozsah výpočtu tj. počet variant, rozsah vstupních parametrů od-do atd. 2) *Response Surface*, což je výsledek celého procesu.





2) Nejprve musíme editovat položku Design of Experiments. Postup je velice jednoduchý, dvojklikem na tuto položku spustíme samotný program *Design Exploration*. Ten je velice jednoduchý a sestává pouze z několika tabulek, ve kterých definujeme základní parametry.



Obr. 14.28 Okno pro definici položky Design of Experiments v programu Design Exploration.

3) Nyní tedy nastavíme rozsah jednotlivých parametrů. Parametr *P1-Lift*, který reprezentuje otevření ventilu, editujeme následujícím způsobem. V položce dolní hranice *Lower Bound* nastavíme hodnotu 0.3. V položce horní hranice *Upper Bound* nastavíme hodnotu 0.6. Následně vybereme parametr *P2 -pinlet*, který reprezentuje vstupní tlak. V položce dolní hranice *Lower Bound* nastavíme hodnotu 10000000. V položce horní hranice *Upper Bound* nastavíme hodnotu 10000000. Další parametry nebudeme definovat. Program automaticky rozdělí rozsahy do tří hodnot, protože tři body jsou postačující pro specifikaci trendu v našem případě. Samozřejmě je možné nastavit i jemnější dělení, ale pak bychom čekali na výsledky neúměrně dlouho a v tomto vzorovém příkladě to není nutné. Již v základním nastavení se bude muset řešit celkem devět variant, a to pro zdvih φ to budou hodnoty 0.3, 0.45 a 0.6 mm. Pro tlak Δ*p* to budou hodnoty 4, 7, 10 MPa, tj. 3x3=9 variant. v obou oknech je také zobrazena položka *Initial Value*, tato položka zobrazuje aktuálně nastavenou v simulaci. Nastavené hranic výpočtu je provedeno dle zadání viz Tab. 14.1



Obr. 14.29 Definování parametrů v projektu Design Exploration.

4) V předchozím kroku jsme nastavili všechny nezbytné parametry pro výpočet projektu. Výpočet zahájíme kliknutím na ikonu ⁷ Update Design of Experiments</sup>. Tím je spuštěno automatické řešení v definovaném rozsahu. Postup výpočtu si můžeme zobrazit pomocí tlačítka show Progress. Ve spodní části se nyní zobrazí okno s *Progress Bar* ukazatelem. Vedle ukazatele je také zobrazen text s informací o právě řešené variantě. Řešení všech devíti variant je poměrně zdlouhavé a může zabrat až několik hodin, v závislosti na výkonu CPU.

		Annual Barrier Ba	NUMBER OF CONTRACTOR				
4	Undate Design of Experiments	File was field true File					
	Dydate Design of Experiments Show Progress Show Progres						
California.	(Thingson) a Parlian						
Progres	5		- ^				
•	A	В	С				
1	Status	Details	Progress				
2	Updating the Design of Experiments cell in Response Surface	Updating DesignPoint 4 of 9: Solving	•				
	Informace o projektu	Detailní informace	Ukazatel stavu				
		Právě řešena čtvrtá varianta z devíti metrické právě řešena čtvrtá varianta z devíti	🚥 Hide Progress 🛛 😕 Show 7 Messages				

Obr. 14.30 Zobrazení procesu řešení v Design Exploration.

5) Po ukončení řešení poslední varianty dosáhne *Progress Bar* ukazatel hodnoty 100% a následně je jeho zobrazení ukončeno. Po ukončení řešení je možné si prohlédnout celou řadu grafů, které umožňují zobrazení procesu výpočtu. Grafy je možné si zobrazit po vybrání položky **Parameters Parallel**, nebo **Design Points vs Parameter**. Například po zvolení položky **Design Points vs Parameter** se zobrazí nové okno, které umožňuje editaci parametrů grafu. Je zde možné definovat položku na ose x a ose y příslušného grafu. Na ose x je možné zvolit také parametr *Design Point*. Tento parametr označuje pořadí výpočtu. Pokud tento parametr použijeme v ose x můžeme si pak zobrazit, jak se měnil vybraný parametr během výpočtu jednotlivých variant. Jako příklad je na následujícím obrázku zobrazen právě graf, který znázorňuje, jak se měnilo otevření ventilu. Postup zobrazení grafu je na Obr. 14.31



Obr. 14.31 Zobrazení grafických výsledků procesu řešení v Design Exploration.

Na grafu je zřetelně vidět, jak se v jednotlivých krocích měnila hodnota otevření. Možná se čitateli zdá, že postup je zcela nelogický, ale postup je založen na pokročilých optimalizačních schématech. Dále se touto problematikou nebudeme zabývat, protože cílem tohoto textu není vysvětlení teorie optimalizace. Změnou parametru na ose y je možné si zobrazit i jiné parametry v závislosti na postupu výpočtu. Pro ilustraci si ještě například zobrazíme funkci





Tyto grafy ukazují pouze jednotlivé body řešení, čímž defacto umožňují analýzu postupu výpočtu.

Analýza výsledků v Design Exploration

V této kapitole provedeme analýzu výsledků a ukážeme si tvorbu grafů, které jsou hlavním výsledkem, který je požadován v zadání.

 Abychom mohli zobrazit výsledky, je nutné je nejprve vygenerovat. Opustíme tedy položku Design of Experiments tlačítkem et le project. Tímto příkazem se vrátíme do základního rozhraní Workbench a ukončíme všechny položky v Design of Experiments. U projektu je vidět, že u položky et le položky et le symbol žlutého blesku, takže tato položka není aktualizována. Levým tlačítkem tedy vybereme položku et le project, levým tlačítkem vyvoláme kontextové menu, a zvolíme příkaz de update, nebo ve Workbench stiskneme tlačítko de project. Tím je tato položka aktualizována a je možné si prohlédnout výsledky. Postup je zobrazen na Obr. 14.33.



Obr. 14.33 Postup vygenerování finálních výsledku v položce Response Surface

2) Okno položky *Response Surface* je identické s položkou *Design of Experiments*. Okno je rozděleno do tří položek. V prví položce jsou zobrazeny informace o parametrech projektu a typy grafických výstupů. Druhé okno obsahuje parametry zvoleného grafického výstupu, a poslední okno obsahuje samotný graf.

Priklad8 - Workbench												
File View Tools Units Help												
📗 🔁 New 📓 Open 📓 Save 🔣 Save As 🗞 Reconnect 📿 Refresh Project 🧭 Update Project 🆓 Import 🎘 Preview Response Surface 🍼 Update Response Surface 😋 Return to Project 🤎												
Toolbox X Outline of Schematic B3: Response Surface			X Response Chart for P3 - VolFlow									
Charts	•	A	В		^	I						
💩 Spider	1		Enabled			7,5		P3 - VolFlo	w			
😓 Local Sensitivity	3	 Input Parameters 				7						
Response	4	ې P1 - Lift	~									
Okno se všemi	5	ြို P2 - pinlet	~			6.5		/				
definevenými	6	 Output Parameters 				Ę		1				
dennovanymi	7	P3 - VolFlow				ິທ ຕ 6 -	Cro	e /				
parametry	8	P4 - deltap			=	É.	Gla					
a výsledky 🕂	9	Response Points				∓ 5,5						
a vysiedky	10	 Response Point 				(*10						
	11	le Spider				3 5						
	12	🏀 Local Sensitivity	·			olFic						
	13	🚺 Response				> 4,5						
	*	New Response Point			-	<u>a</u>						
	Properties of Outline A13: Response				_ ×	4 -	-					
	▼ A		В		·	3.5						
1		Property		Value		-,-						
	Axes					з.						
6 X Axis		P1 - Lift		▼ 13	0,3	0,35 0,4 0,	45 0,5 0,5	5 0,6				
	7 YAxis		P3 - VolFlow	•		P1 -	Lift					
	0	Parameters										
	Progress A						C	_ ×				
			Dataila		Bragger							
1 Status)	Details			Progress					
View All/Customize Okno s detailním nastavením parametru grafu												
Messages (all is a charge and D												
Ready (Zue je vybran graf <i>Kesponse</i>)												

Obr. 14.34 Okno pro definici položky Design of Experiments v programu Design Exploration.

 V okně s detailním nastavením je možné vygenerovat 2D graf s libovolnou kombinací parametrů *P1* až *P4*. Na následujícím obrázku jsou uvedeny dva příklady možných grafů viz Obr. 14.35.



Obr. 14.35 Příklad grafických výsledků $Q = f(\varphi)$ vlevo, $\Delta p = f(\varphi)$ vpravo

4) Pokud chceme vytvořit 3D graf, je nutné si zobrazit v okně detailů grafu jeho první položku. Zde je možné změnit typ grafu na 3D, tím se rozšíří počet os grafu na tři. U 2D grafu je možné kombinovat libovolně dva parametry ze seznamů *P1-P4*. U 3D grafu je již možné libovolně kombinovat tři parametry. V položce *Mode* zvolíme typ grafu 3D. A nastavíme u jednotlivých os například tyto parametry. U osy x zvolíme parametr *P2 –pinlet* (vstupní tlak), u osy y *P1 – Lift* (otevření ventilu), a u osy z *P3 – VolFlow* (objemový průtok). Tím se vygeneruje 3D graf funkce *Q* = *f*(*p*_{vstup}, φ) definované v zadání. Graf je možné různě přetáčet, a výběrem libovolné osy, která je nyní zobrazena v levém dolním rohu je možné graf otočit tak, aby tato osa směrovala"kolmo na obrazovku". Vznikne tak půdorysný pohled. V následujícím obrázku je ilustrován postup při definici 3D grafu. Po prohlédnutí výsledků je možné se vrátit do projektu *Workbench* tlačítkem GReturn to Project a uložit celý projekt. Tím je kompletně ukončena celá tato rozsáhlá úloha.





Animaci kompletního procesu tvorby parametrické simulace s využitím programu *Design Exploration* uživatel zobrazit

- odkazem <u>ANIMACE</u>
- spustit ručně z adresáře Animace\Priklad8\ soubor Priklad8_Video4.exe



Input Parameter je vstupní parametr simulace s využitím programu *Design Exploration*. **Output Parameter** je výstupní parametr simulace s využitím programu *Design Exploration*.



- 1. V čem vidíte výhody programu Design Exploration.?
- 2. Jak zvolíte vstupní a výstupní parametry simulace, ilustrujte na příkladu (odlišný od řešeného)?
- 3. Proč jsou řešeny jednotlivé varianty zdánlivě náhodným způsobem?
- 4. Je možné vytvořit více vstupních parametrů simulace?
- 5. Proč je nutné definovat okrajovou podmínku, kterou chceme použít jako parametr, vzorcem, i když je konstantní?
- 6. Na co je nutné brát zřetel při síťování u simulací s proměnnou geometrií?

DALŠÍ ZDROJE

- Kozubková, M., Drábková, S.: *Modelování proudění Fluent I* [Online]. c2008.
 Ostrava: VŠB TUO, 154 s, poslední revize 1.8.2010, [cit. 2010-06-14].
 Dostupné z: <URL: <u>http://www.338.vsb.cz/studium9. htm</u> >.
- [2] Ansys Inc. CFX 12.0 ANSYS CFX, Release 12.0: Dokumentace k programu
- [3] Janalík, J., Šťáva, P.: *Mechanika tekutin*. [Online]. c2002. Ostrava: VŠB TUO, 126 s, poslední revize 10.8.2006 [cit. 2006-08-14].
 Dostupné z: <URL: <u>http://www.338.vsb.cz/studium9a.htm</u>>.
- [4] Drábková, S., a kol: Elearningová výuka předmětu Mechanika tekutin <u>http://www.338.vsb.cz/studium9a.htm</u>