

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÉ STANOVENÍ ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI

Studijní opora

Ing. Petra Kočvarová Ing. Barbora Frodlová

Ostrava 2011



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 "Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu".

Název: Experimentální a numerické stanovení ztrát na vzduchové trati

Autor: Ing. Petra Kočvarová, Ing. Barbora Frodlová

Vydání: první, 2011

Počet stran: 81

Náklad:

Studijní materiály pro studijní obor Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení Fakulty strojní.

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Název:

Číslo:

Realizace:



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu CZ.1.07/2.3.00/09.0147

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

 $\ensuremath{\mathbb{C}}$ Ing. Petra Kočvarová, Ing. Barbora Frodlová

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2716-2

POKYNY KE STUDIU

Experimentální a numerické stanovení ztrát na vzduchové trati

Pro předměty z oboru Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení jste obdrželi studijní balík obsahující:

- přístup do e-learningového portálu obsahujícího studijní oporu a doplňkové animace vybraných částí kapitol,
- CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol.

Prerekvizity

Pro studium této opory se předpokládá znalost na úrovni absolventa předmětu Mechanika tekutin či Hydrodynamika a hydrodynamické stoje.

Cílem učební opory

Cílem je seznámení studenta s měřením ztrát na vzduchové trati, vyhodnocením měření a následné seznámení se software, v němž probíhá příprava geometrie, tvorba výpočtové sítě a samotný výpočet. Po prostudování modulu by měl student být schopen popsat měřicí zařízení, dané úlohy sám odměřit a vyhodnotit. K ověření správnosti měření by měl být student schopen dané úlohy připravit pro numerický výpočet a tento výpočet také provést a vyhodnotit. Poté obě varianty, jak experimentální, tak numerické vyhodnocení, porovnat.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do bakalářského a magisterského studia oboru Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení, studijního programu B2341 Strojírenství a N2301 Strojní inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Studijní opora 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.



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
 - Fopsat ...
 - 🔸 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 praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavním významem předmětu schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti pro řešení reálných situací.



Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek 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 tímto učebním textem Vám přejí autoři

Ing. Petra Kočvarová, Ing. Barbora Frodlová

OBSAH

1	HYDRAULICKÉ ODPORY = ZTRÁTY									
	1.1	Třecí z	cí ztráty v potrubí							
		1.1.1	Laminární proudění	9						
		•	Ztráty třením v potrubí nekruhového průřezu při laminárním proudění	10						
		1.1.2	Turbulentní proudění	10						
		•	Ztráty třením v potrubí nekruhového průřezu při turbulentním proudění	10						
	1.2	Místni	í ztráty v potrubí	11						
		1.2.1	Typy místních ztrát	12						
		•	Vstup do potrubí	12						
		•	Změna směru proudu – koleno, ohyb, zakřivené potrubí	12						
		•	Náhlé rozšíření průřezu	13						
		•	Náhlé zúžení průřezu	14						
2	EXPERIMENTÁLNÍ VYHODNOCENÍ ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI 16									
	2.1	Popis	měřicího zařízení	16						
		2.1.1	Specifikace použitých prvků	17						
		•	Elektromotor a ventilátor (M+V)	17						
		•	Frekvenční měnič (FM)	18						
		•	Snímač tlakové diference (DM)	19						
		•	Vyhodnocovací zařízení (A)	19						
		•	Clona (C)	20						
		•	Plastové potrubí	20						
		•	Plastové potrubí – koleno	21						
	2.2	Postup	o měření na vzduchové trati	21						
		2.2.1	Cejchovní křivka clony	22						
	2.3	Vyhod	lnocení výsledků měření ztrát na vzduchové trati	22						
		2.3.1	Vzduchová trať A	23						
		2.3.2	Vzduchová trať B	26						
		2.3.3	Shrnutí výsledků měření	28						
3	T V	VORBA	A GEOMETRIE PRO NUMERICKÉ STANOVENÍ ZTRÁT HOVÉ TRATI	' NA 30						
	3.1	Úvod (do software Autodesk Inventor	30						

		3.1.1	Uživatelské prostředí programu Autodesk Inventor	1				
	3.2	Vlastni	tvorba geometrie	2				
		3.2.1	Tvorba geometrie A 3	3				
		3.2.2	Tvorba geometrie B 3	3				
4	Т	VORBA	VÝPOČTOVÉ SÍTĚ PRO NUMERICKÉ STANOVENÍ ZTRÁT NA	4				
	V	ZDUCH	IOVÉ TRATI3	6				
	4.1	Úvod do software Ansys Meshing3						
	4.2	Uživatelské prostředí programu Ansys Meshing						
	4.3	Vlastni	tvorba výpočtové sítě3	9				
		4.3.1	Výpočtová síť pro geometrii A 3	9				
		4.3.2	Výpočtová síť pro geometrii B 4	2				
5	Ν	UMERI	CKÝ VÝPOČET ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI	4				
	5.1	Úvod d	o software Ansys Fluent4	4				
		5.1.1	Obecné schéma postupu práce v programu Ansys Fluent4	6				
	5.2	Uživatelské prostředí programu Ansys Fluent						
		5.2.1	Roletové menu programu Ansys Fluent 4	8				
		5.2.2	Funkce dostupné z panelu nástrojů programu Ansys Fluent5	0				
		5.2.3	Funkce z panelu definičních nástrojů programu Ansys Fluent	0				
	5.3	.3 Nastavení výpočtu v software Fluent						
		5.3.1	Nastavení výpočtu pro proudění vzduchu v potrubí o geometrii A 5	1				
		5.3.2	Nastavení výpočtu pro proudění vzduchu v potrubí o geometrii B 6	0				
6 VYHODNOCENÍ NUMERICKÉHO VÝPOČTU ZTRÁT NA VZDUCH								
	TRATI							
	6.1	6.1 Výsledky numerického výpočtu pro geometrii A						
		6.1.1	Vyhodnocení třecích ztrát 6	8				
	6.2	2 Výsledky numerického výpočtu pro geometrii B						
	6.3	Celkové shrnutí výsledků fyzikálního a numerického experimentu na obou geometriích						
	DAL	LŠÍ ZDROJE						
	KLÍ	KLÍČ K ŘEŠENÍ						

1 HYDRAULICKÉ ODPORY = ZTRÁTY

Hydraulické ztráty jsou způsobené překonáváním hydraulických odporů. Určení hydraulických ztrát je důležité z hlediska hydraulického výpočtu potrubí. Ten je založen na aplikaci rovnice kontinuity, Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu a právě na určení hydraulických odporů, jiným slovem ztrát. Ztráty vznikají při proudění skutečných kapalin následkem viskozity. Jsou to vlastně síly, které působí proti pohybu částic tekutiny. Mechanismus hydraulických odporů je složitý jev, který dosud není přesně vyřešen, až na jednodušší případy laminárního proudění. Proto se v hydraulických výpočtech uplatňuje řada poloempirických metod.

Hydraulické ztráty jsou závislé na řadě parametrů, např. viskozitě tekutiny, geometrii potrubí a jeho drsnosti, ale hlavně na rychlosti proudění. Ztrátová energie se projeví buď jako snížení polohové energie, tlakový úbytek nebo úbytek kinetické energie. Ztráty se při výpočtu vyjadřují jako násobek kinetické energie vztažené na střední objemovou rychlost. Ztrátová energie se vztahuje na jednotku hmotnosti nebo tíhy a platí vztah (1.1) [1]:

$$e_z = gh_z = \frac{p_z}{\rho} = \zeta \frac{v^2}{2} \tag{1.1}$$

kde je e_z – měrná ztrátová energie [J·kg⁻¹],

- h_z ztrátová výška [m],
- p_z tlaková ztráta [Pa], $p_z = p_1 p_2$, kde $p_1 > p_2$,
- $v střední rychlost [m \cdot s^{-1}],$
- ζ ztrátový součinitel, závislý na druhu ztrát [1].

Hodnotu ztrátového součinitele lze buď vypočítat, nebo nalézt v příručkách. Zpravidla se předpokládá, že každý hydraulický odpor se projevuje nezávisle na účinku ostatních odporů. Celková ztráta je pak dána součtem jednotlivých ztrát způsobených každým odporem samostatně.

Z hlediska fyzikální podstaty lze ztráty rozdělit na dva typy – třecí a místní. U dlouhých potrubí převažují třecí ztráty, jejichž příčinou jsou třecí síly a které jsou úměrné délce potrubí. V místech, kde se mění velikost rychlosti (změna průřezu potrubí), směr rychlosti (zakřivené potrubí, ohyby) nebo velikost i směr rychlosti, se uplatní ztráty místní, které jsou způsobeny vířením tekutiny.

Tyto návody slouží právě pro teoretické seznámení se s měřením ztrát v potrubí, ve kterém je proudícím médiem vzduch. Následuje praktická ukázka celého měření se zpracovanými výsledky měření. Následně je pro úlohy proudění vzduchu v trubce využito numerického výpočtu v software Fluent, který přesně simuluje fyzikální experiment.

1.1 Třecí ztráty v potrubí





Výklad

Třecí ztráty závisí jednak na tekutině dopravované potrubím (na množství, hustotě, viskozitě nebo koncentraci příměsí) a jednak na potrubí (jeho délce, průměru, drsnosti). Protože se některé z těchto uvedených veličin mohou měnit (např. vlivem koroze materiálu potrubí), lze říci, že třecí ztráty závisí i na čase. Jedním z nejpoužívanějších vzorců je vztah (1.2) [1]:

$$e_{z} = gh_{z} = \frac{p_{z}}{\rho} = \zeta_{t} \frac{v^{2}}{2} = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^{2}}{2}$$
(1.2)

kde je ζ_t – ztrátový součinitel třecích ztrát [1],

 λ – součinitel tření [1],

L – délka potrubí [m],

d – průměr potrubí [m].

Velikost ztrátové výšky i tlakové ztráty lze určit ze vztahu (1.2) a dostaneme:

$$p_z = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \rho; \qquad h_z = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}$$
(1.3)

Třecí ztráty rostou s délkou potrubí a závisí na režimu proudění, tj. na Reynoldsově čísle. Proto pro další definování vztahů pro výpočet třecích ztrát bude třeba proudění rozdělit na proudění při režimu laminárním a turbulentním.

1.1.1 Laminární proudění

O laminárním režimu proudění mluvíme, pokud je Reynoldsovo číslo Re < 2320. Pro součinitel tření λ se použije vztah (1.4) [1] pro kruhový průřez potrubí:

$$\lambda = \frac{64}{Re};$$
 kde $Re = \frac{vd}{v}, \quad v = \frac{\eta}{\rho}$ (1.4)

kde je v – kinematická viskozita [m²·s⁻¹],

 η – dynamická viskozita [Pa·s].

4 Ztráty třením v potrubí nekruhového průřezu při laminárním proudění

Laminární proudění se dá v nekruhových potrubích řešit matematicky. U laminárního proudění se třením o stěny potrubí zbrzdí částice v celém průtočném průřezu. Mezní vrstva vyplňuje celý průtočný průřez a jeho tvar má vliv na rozložení rychlosti nebo rychlostní profil. Proto je nutno pro každý průřez odvodit vztah pro třecí ztráty a nelze jej přepočítat z jednoho průřezu na druhý [1].

1.1.2 Turbulentní proudění

U turbulentního režimu proudění je tečné napětí větší, proto jsou ztráty třením větší než u laminárního proudění. Součinitel tření závisí na Reynoldsově čísle a na relativní drsnosti k_r [1]:

$$k_r = \frac{k}{d} \tag{1.5}$$

kde je k – absolutní drsnost stěny potrubí [mm], definovaná jako střední hodnota nerovnosti na stěně.

Pro výpočet součinitele tření byly rovnice stanoveny na základě experimentálního měření. *Blasius* odvodil empirický vztah pro hladké potrubí, kdy k = 0 [1]:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \qquad \text{pro } Re_k \le Re \le 80000 \tag{1.6}$$

Pro větší rozsah Reynoldsova čísla platí empirický vztah s konstantami např. dle *Nikuradseho* [4]:

$$\lambda = 0,0032 + 0,221Re^{-0.237} \qquad \text{pro } Re_k \le Re \le 1,5 \cdot 10^6 \tag{1.7}$$

V *Altšulově* vztahu se již uvažuje s drsností stěny potrubí a součinitel tření λ je vyjádřen ve formě [1]:

$$\lambda = 0, 1 \left(\frac{100}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0.25}$$
(1.8)

4 Ztráty třením v potrubí nekruhového průřezu při turbulentním proudění

Vliv třecích sil se na obtékaných stěnách omezuje na menší vrstvu, která je ve srovnání s rozměry potrubí velmi malá. Tvar průtokového průřezu potrubí nemá v podstatě vliv na součinitel tření, ztráty třením při turbulentním proudění v potrubí nekruhového průřezu jsou tedy určeny stejnými vzorci jako pro kruhové potrubí. Místo průměru potrubí d se dosadí ekvivalent pro nekruhové potrubí – hydraulický průměr d_h [1]:

$$d_h = \frac{4S}{O} \tag{1.9}$$

kde je $S - \text{průtočný průřez } [m^2],$

O – omočený obvod [m].

Hydraulický průměr d_h je tedy ekvivalent nekruhového průřezu a představuje kruhové potrubí o světlosti $d = d_h$, v němž jsou třecí ztráty stejné jako v nekruhovém průřezu potrubí. Hydraulický průměr lze dosadit do výrazu pro poměrnou drsnost, do Reynoldsova čísla i do výrazu pro ztrátovou výšku.

1.2 Místní ztráty v potrubí

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Definovat hydraulické ztráty v potrubí.
- Uvést rozdíl mezi třecími a místními ztrátami.
- Definovat vztahy pro výpočet místních ztrát.



Místní ztráty jsou přídavné ztráty ke ztrátám třecím. V každém systému vedle rovných potrubních úseků bývají i různá kolena, odbočky, rozšíření či zúžení potrubí, clony, dýzy, chladiče apod., kde dochází ke změnám velikosti průřezu či směru proudění. V těchto částech potrubí dochází ke změně velikosti i směru rychlosti proudění, což vyvolává víření, popřípadě odtržení proudu kapaliny. Kinetická energie těchto vírů se odebírá z energie hlavního pohybu proudu tekutiny, tj. energie se změní v teplo – disipuje. Energie proudící kapaliny se rozptyluje v místě potrubí, kde dochází ke změně vektoru rychlosti, proto je rozptyl nazván místními ztrátami.

Velikost místních ztrát, tj. ztrátové energie při místních ztrátách, se vyjadřuje podobně, jako u ztrát třecích pomocí ztrátové výšky h_z , tlakové ztráty p_z a součinitele místní ztráty ζ_m [1]:

$$e_{z} = gh_{z} = \frac{p_{z}}{\rho} = \zeta_{m} \frac{v^{2}}{2}$$
(1.10)

kde je ζ_m – ztrátový součinitel místních ztrát [1].

Ztrátový součinitel závisí na druhu místní ztráty, na geometrii a konstrukčních parametrech potrubí, drsnosti stěn, tvaru rychlostního profilu a také na režimu proudění. Vliv

Reynoldsova čísla na místní ztráty je patrný zejména při malých hodnotách *Re*. Ztrátový součinitel se určuje především experimentálně z měření.

Místní ztráty v potrubí lze vyjádřit **ekvivalentní délkou** l_e **potrubí**, v němž je ztráta třením stejně velká jako místní ztráta (1.10). Za součinitel tření a průměr se dosazují hodnoty platné pro rovný úsek potrubí.

$$\zeta_m \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{v^2}{2g} \Longrightarrow l_e = \frac{\zeta_m}{\lambda} d$$
(1.11)

1.2.1 Typy místních ztrát

Pro informaci si uvedeme některé nejčastější typy ztrát, jako je vstup do potrubí, změna směru proudu či náhlé zúžení/rozšíření průřezu.

4 Vstup do potrubí

Při velkých hodnotách $Re > 10^3$ budou hodnoty ztrátových součinitelů záviset jen na geometrii vstupu. Pro dokonale zaoblený vstup, Obrázek 1.1 a), bude $\zeta = 0,03$, pro ostrohranný pravoúhlý vstup, Obrázek 1.1 b), bude $\zeta = 0,5$ a pro Bordův nátrubek, tj. potrubí zasunuté do nádrže s tekutinou, Obrázek 1.1 c), bude $\zeta > 1$.



Obrázek 1.1 Různé typy vstupu do potrubí: a) zaoblený, b) ostrohranný, c) Bordův nátrubek [2]

Při výrobě však nelze docílit dokonalou geometrickou podobnost, je proto třeba u všech místních ztrátových součinitelů počítat s poměrně velkým rozptylem.

4 Změna směru proudu – koleno, ohyb, zakřivené potrubí

Vzhledem k nerovnoměrnému rozložení rychlosti ve vstupním průřezu (maximální rychlost je v ose potrubí) a vlivem účinku odstředivých sil bude proudění v těchto případech vždy prostorové. Částice tekutiny se pohybují v ohybech po šroubovici (Obrázek 1.2). Za ohybem dochází na vnitřní straně k odtržení proudu. U ostrohranných ohybů se vytvářejí víry i na vnější straně. [2]



Obrázek 1.2 Proudění v ohybu [2]

Ztrátový součinitel pro ohyby a kolena bude závislý na velikosti změny směru proudu a na relativním poloměru zakřivení r/d. Dle relativního poloměru zakřivení a úhlu zakřivení ohybu lze z grafu na Obrázek 1.3 určit součinitel místní ztráty.



Obrázek 1.3 Graf pro určení součinitele místní ztráty pro ohyb kruhového průřezu [3]

Náhlé rozšíření průřezu

Při změnách průřezu se mění průtočná rychlost a místní ztráty lze vyjádřit v závislosti na přítokové rychlosti v_1 nebo odtokové rychlosti v_2 , Obrázek 1.4.



Obrázek 1.4 Náhlé rozšíření průřezu [1]

Pro přepočet ztrátových součinitelů lze odvodit vztah (1.12) [3]:

$$h_{zm} = \zeta_1 \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_2 \frac{v_2^2}{2g} \Longrightarrow \zeta_2 = \zeta_1 \frac{v_1^2}{v_2^2}$$
(1.12)

Pro kruhové průřezy platí [3]:

$$\zeta_{1} = \zeta_{2} \left(\frac{v_{2}}{v_{1}} \right)^{2} = \zeta_{2} \left(\frac{S_{1}}{S_{2}} \right)^{2} = \zeta_{2} \left(\frac{d_{1}}{d_{2}} \right)^{4}; \qquad \zeta_{2} = \zeta_{1} \left(\frac{d_{2}}{d_{1}} \right)^{4}$$
(1.13)

Při náhlém rozšíření průřezu proud kapaliny nebude sledovat stěny potrubí, ale dojde k odtržení proudu, proud se bude rozšiřovat postupně a u stěn se vytvoří víry. Poté se proud kapaliny rozšíří po celém průřezu. Při rozšíření průřezu klesá střední rychlost, a proto stoupá statický tlak. Pomocí Bernoulliho rovnice a věty o změně hybnosti odvodil Borda vztah pro ztrátovou výšku [3]:

$$h_{z} = \frac{(v_{1} - v_{2})^{2}}{2g} = \underbrace{\left(1 - \frac{S_{1}}{S_{2}}\right)^{2}}_{\zeta_{1}} \frac{v_{1}^{2}}{2g} = \underbrace{\left(\frac{S_{2}}{S_{1}} - 1\right)^{2}}_{\zeta_{2}} \frac{v_{2}^{2}}{2g}$$
(1.14)

Náhlé zúžení průřezu

Ke ztrátám dochází v místě náhlé změny průřezu, viz Obrázek 1.5. Zúžení však může být výhodné např. v systémech s odstupňovaným potrubím, kde lze zúžením vyvolat zrychlení kapaliny.



Obrázek 1.5 Náhlé zúžení průřezu [3]

Proud kapaliny nemůže následkem setrvačnosti sledovat tvar stěn potrubí, a proto se odtrhne a vzniknou vířivé oblasti. Matematické řešení ztráty zúžením vychází ze změny hybnosti kapaliny.

Ztrátová výška náhlým zúžením průřezu je určena [4]:

$$h_{z} = \frac{p_{1} - p_{2}}{\rho g} + \frac{v_{1}^{2} - v_{2}^{2}}{2g} = \left(\frac{S_{1}}{S_{2}} - 1\right) \frac{S_{1}}{S_{2}} \frac{v_{1}^{2}}{2g} = \left(1 - \frac{S_{2}}{S_{1}}\right) \frac{v_{2}^{2}}{2g}$$
(1.15)

kde [4]:

(1.16)

$$\zeta_1 = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \frac{S_1}{S_2}$$
 a $\zeta_2 = 1 - \frac{S_2}{S_1}$

Shrnutí pojmů 1

Hydraulické odpory – jiným slovem ztráty, které jsou způsobené překonáváním hydraulických odporů. Určení hydraulických ztrát je důležité z hlediska hydraulického výpočtu potrubí. Ztráty vznikají při proudění skutečných kapalin následkem viskozity. Hydraulické ztráty jsou závislé na řadě parametrů, např. viskozitě tekutiny, geometrii potrubí a jeho drsnosti, ale hlavně na rychlosti proudění. Ztráty se dělí na třecí a místní.

Třecí ztráty – převažují u dlouhých potrubí, jejich příčinou jsou třecí síly a jsou úměrné délce potrubí.

Místní ztráty – uplatní se v místech, kde se mění velikost rychlosti (změna průřezu potrubí), směr rychlosti (zakřivené potrubí, ohyby) nebo velikost i směr rychlosti. Jsou způsobeny vířením tekutiny.

Otázky 1

- 1. Co jsou to hydraulické odpory?
- 2. Jak dělíme ztráty? Popište, jak jednotlivé ztráty vznikají a na čem závisí.

2 EXPERIMENTÁLNÍ VYHODNOCENÍ ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI

Vyhodnocení ztrát potrubí je zásadním krokem pro správný návrh potrubního systému i ventilátoru, který vhání do systému vzduch určitou rychlostí a tlakem. Jak vznikají ztráty a jaké druhy ztrát rozlišujeme, bylo uvedeno v kap. 1. Již bylo řečeno, že třecí ztráty závisejí na délce potrubí a projeví se jako tlakový úbytek. Naopak místní ztráty se projeví na obloucích, ohybech, clonách atd.

V této kapitole se seznámíme s měřicím zařízením pro měření ztrát na vzduchové trati, tedy s jeho stavbou, použitými měřidly, prvky a jejich funkcí (kap. 2.1). Následuje popis postupu měření na vzduchové trati (kap. 2.2) a v kap. 2.3 se nachází vyhodnocení měření.

2.1 Popis měřicího zařízení



Výklad

Měřicí trať se nachází na VŠB-TUO na Katedře hydromechaniky a hydraulických zařízení, Obrázek 2.1. Přidáním či odebráním jednotlivých částí potrubí se dá měnit skladba a geometrie měřicí tratě. K měření byly použity dvě různé vzduchové tratě, které jsou pro lepší orientaci pojmenovány písmeny A a B. Trať A i B se skládá z ventilátoru **V**, na který je připojeno plastové potrubí o průměru 46 mm. Ventilátor je poháněn elektromotorem **M**, který je ovládán frekvenčním měničem **FM**, pomocí něhož lze měnit otáčky a tím i průtok. Za výstupem z ventilátoru následuje přímý úsek plastového potrubí o délce 0,335 m. Za tímto úsekem je umístěna clona **C** jako průřezové měřidlo k určení velikosti průtoku vzduchu. Dále u trati A následuje přímý úsek potrubí o délce 2,26 m. Odběrná místa se nacházejí v 0,5 m a v 2,2 m od začátku tratě. Měření tlakové ztráty tedy proběhne na měřené délce 1,7 m. Trať je za druhým odběrným místem ukončena krátkým rovným úsekem potrubí. U trati B je za rovný úsek potrubí o délce 2,26 m připojeno koleno s poloměrem r = 70 mm, úhlem 90° a vnitřním průměrem zahnutého potrubí 31 mm s odběrným místem přímo v ohybu kolene. Odběrná místa na této trati se nacházejí v 0,5 m a v 2,7732 m od začátku tratě. Měření tlakové ztráty tedy proběhne na měřené délce 1,7 m. Trať

Odběry tlaků k měření tlakové ztráty po délce jsou realizovány pomocí silonových kroužků **K**, které spojují dva úseky potrubí. Odběrné kroužky mají po obvodě symetricky umístěná tři odběrná místa z důvodu měření střední hodnoty statického tlaku v daném

průřezu. K měření diference tlaku se používají diferenční manometry **DM**, které mají analogové výstupy. Rozsah snímačů tlakové diference je 0 Pa až 2500 Pa. K vyhodnocení analogového výstupu ze snímače diferenčního tlaku je použito zařízení ALMEMO 2290-3 **A**.

Tlaková diference je tedy měřena vždy na cloně a na určitém úseku potrubí, u trati A na přímém úseku délky 1,7 m, u trati B na úseku o délce 2,2732 m. Hodnota střední rychlosti proudu vzduchu se odečte z cejchovní křivky clony.



Obrázek 2.1 Měřicí zařízení – vzduchová trať

2.1.1 Specifikace použitých prvků

Každá z obou použitých vzduchových tratí, A i B, se skládá z následujících prvků:

↓ Elektromotor a ventilátor (M+V)

Тур:	HRD1TFU-105/0,75
Výkon:	7,0 m ³ /min, 4,90 kPa
Max. otáčky:	6090 min ⁻¹
Napětí:	∆/⊥ 230/400 V
Frekvence:	105 Hz
Výkon motoru:	0,75 kW
Proud:	3,05/1,75 A



Obrázek 2.2 Elektromotor s ventilátorem

♣ Frekvenční měnič (FM)

Тур:	COMBIVERT			
Napájení:	3×400 V			
Výkon:	0,75 W			
Jmenovitý proud:	2,6 A			
Maximální proud:	5,6 A			
Max. výstupní frekvence: 1600 Hz				
Stupeň ochrany:	IP 20/VBG 4			
Provozní teplota:	-10 +45 °C			
Výrobce:	Karl E. Brinkmann GmbH			

Výrobce: Elektror, Karl W. Muller, D-73728 Esslingen



Obrázek 2.3 Frekvenční měnič

Snímač tlakové diference (DM)

Typ: FD8612DPS

Měřicí rozsah: 0-2500 Pa

Výstup: analogový (0-10 V)

Napájecí napětí: 6 V

Přesnost: +- 1%

Maximální měřitelný tlak (přetižitelnost): 12500 Pa (pěti násobná)



Obrázek 2.4 Snímač tlakové diference

↓ Vyhodnocovací zařízení (A)

Typ:ALMEMO 2290-3Napájení:9 V

- Vstup: 2 analogové vstupy
- Výstup: 2 analogové výstupy

Výrobce: AHLBORN Mess- und Regelungstechnik GmbH



Obrázek 2.5 Vyhodnocovací zařízení ALMEMO

🖊 Clona (C)

VŠB-TUO

Materiál:

Výrobce:

silon



Obrázek 2.6 Geometrie a foto clony

Plastové potrubí

Materiál: plast



Obrázek 2.7 Geometrie rovného potrubí

Plastové potrubí – koleno

Materiál: plast

Rozměry kolene:

- A 155 mm
- B 215 mm
- C 145 mm
- D R70
- E Ø31 mm



Obrázek 2.8 Geometrie zahnutého potrubí - kolene

2.2 Postup měření na vzduchové trati

	Čas ke studiu: 1 hodina
0	 Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět Popsat postup měření tlakové diference na vzduchové trati. Naměřit potřebné veličiny k určení třecích ztrát.
	Výklad

Postup měření na obou tratích bude naprosto stejný, proto bude vysvětlen na vzduchové trati A.

Nejdříve je potřeba připojit pomocí hadiček snímač tlakové diference na odběrná místa, tj. před a za měřený prvek. V našem případě je měřeným prvkem clona a daný úsek potrubí (vzduchová trať A nebo B). Tento snímač tlakové diference se zapojí do vyhodnocovacího zařízení ALMEMO. Ostatní odběry tlaku musí být zatěsněné. Pokud je vše takto nastaveno, může se započít s měřením tím, že se pustí ventilátor.

Ventilátor se pomocí frekvenčního měniče nastaví na maximální otáčky. Při maximálních otáčkách se odečtou hodnoty tlakové diference na cloně Δp_c a na měřeném úseku potrubí Δp_t . Naměřené hodnoty pro dané otáčky je vhodné zapisovat do tabulky.

Měření pokračuje postupným snižováním frekvence na frekvenčním měniči, čímž se snižují otáčky ventilátoru a tím zároveň průtok vzduchu. Pro každou hodnotu průtoku se odečtou hodnoty tlakové diference na průřezovém měřidle, tj. na cloně Δp_c , a na naměřeném úseku potrubí Δp_c . Postup opakujeme minimálně 10x až do dosažení minimálního průtoku.

Je třeba také zkontrolovat teplotu vzduchu v místnosti, podle které se určí hustota a kinematická viskozita, hodnoty potřebné pro výpočet.

2.2.1 Cejchovní křivka clony

Pro naměření a vyhodnocení potřebných veličin je nutné znát průtok vzduchu potrubím a tedy cejchovní křivku clony. Pomocí této cejchovní křivky lze z tlakového spádu na cloně určit průtok vzduchu v potrubí. Rychlost proudění je úměrná tlakovému spádu na cloně, Obrázek 2.9.



Obrázek 2.9 Cejchovní křivka clony [5]

2.3 Vyhodnocení výsledků měření ztrát na vzduchové trati

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✤ Početně a graficky vyhodnotit naměřená data.
- Sestrojit graf závislosti průtoku vzduchu na tlakové diferenci pro měřený úsek

potrubí.

Sestrojit graf závislosti vypočteného ztrátového součinitele tření na Reynoldsově čísle pro měřený úsek potrubí.

Výklad

Naměřené hodnoty pro každou z geometrií seřadíme do tabulky a vypočítáme potřebné veličiny pro vyhodnocení měření, viz Tabulka 2.1 a Tabulka 2.2.

2.3.1 Vzduchová trať A

Na vzduchové trati A byla proměřena tlaková diference na cloně a na rovném potrubí o délce 1,7 m. Měření probíhalo při teplotě vzduchu 15 °C. V Tabulka 2.1 jsou seřazeny naměřené a vypočítané hodnoty, z nichž lze poté vytvořit grafy různých závislostí.

Otáčlav	Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty					
[s ⁻¹]	Δp_c [Pa]	Δp_t [Pa]	v_s [m·s ⁻¹]	$\frac{Q_{v}}{[\mathrm{m}^{3}\cdot\mathrm{s}^{-1}]}$	Re [1]	λ [1]	$\lambda_{\mathrm{N,B}}$ [1]	
80	1750	743	48,08716	0,079916	1,52E+05	0,014194935	0,0162720	
75	1520	650	44,61363	0,074144	140954,5	0,014427168	0,0165064	
70	1310	573	41,22006	0,068504	130232,7	0,014898419	0,0167582	
65	1117	496	37,86846	0,062934	119643,5	0,015280204	0,0170335	
60	936	421	34,46866	0,057284	108902	0,015654385	0,0173454	
55	776	356	31,19637	0,051845	98563,33	0,016160129	0,0176838	
50	626	297	27,82696	0,046246	87917,87	0,016944459	0,0180815	
45	491	238	24,45305	0,040639	77258,17	0,017583839	0,018978	
40	380	186	21,33592	0,035458	67409,76	0,018050653	0,019636	
35	275	140	17,96294	0,029853	56753,01	0,019167958	0,020499	
30	190	97	14,7548	0,024521	46617,04	0,019683749	0,021533	
25	116	61	11,34767	0,018859	35852,38	0,020927595	0,022994	
20	62	29	8,130929	0,013513	25689,26	0,019378512	0,024992	
15	22	5	4,685022	0,007786	14802,09	0,01006351	0,028685	

Tabulka 2.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro geometrii A

Veškeré vypočítané hodnoty byly stanoveny dle následujících vzorců. Vzorový výpočet byl proveden pro maximální hodnotu průtoku vzduchu při otáčkách 80 s⁻¹.

Střední rychlost v_s byla určena z rovnice cejchovací křivky clony (viz Obrázek 2.9):

$$v_s = 0.9045 \cdot \Delta p_c^{0.5321} = 0.9045 \cdot 1750^{0.5321} = 48,08716 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Objemový průtok je dán z rovnice kontinuity:

$$Q_v = v_s \frac{\pi d^2}{4} = 48,08716 \cdot \frac{\pi 0,046^2}{4} = 0,079916 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo se vypočítá ze známého vztahu:

$$Re = \frac{v_s d}{v} = \frac{48,08716 \cdot 0,046}{1,45595 \cdot 10^{-5}} = 1,52 \cdot 10^{5}$$

kde v je kinematická viskozita vzduchu, pro vzduch o teplotě 15°C je $v = 1,45595 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [3].

Třecí součinitel λ se určí ze vztahu (1.3):

$$\lambda = \frac{2d\,\Delta p_t}{Lv_s^2\,\rho} = \frac{2\cdot0,046\cdot743}{1,7\cdot48,08716^2\cdot1,225} = 0,014195$$

kde hustota pro vzduch o teplotě 15°C je $\rho = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [3].

Teoretický třecí součinitel je nutné počítat dle Nikuradseho (1.7) pro vyšší hodnoty Reynoldsova čísla a dle Blasia (1.6) do hodnoty Re = 80000.

$$\lambda_{\rm N} = 0,0032 + 0,221 Re^{-0,237} = 0,016272$$
$$\lambda_{\rm B} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{77258,17}} = 0,018978$$

Závislost tlakové ztráty třením na objemovém průtoku pro měřený úsek potrubí se zobrazí graficky, nejlépe pomocí programu Excel. Pomocí regrese se stanoví typ a koeficienty funkční závislosti.



Obrázek 2.10 Graf závislosti tlakové ztráty potrubí na objemovém průtoku

Závěrem se vyhodnotí závislost vypočteného součinitele tření na Reynoldsově čísle pro měřený úsek potrubí. Pro srovnání se vyhodnotí třecí součinitel dle Nikuradseho a Blasia.



Obrázek 2.11 Graf závislosti součinitele tření z měření a dle Blasia na Reynoldsově čísle

2.3.2 Vzduchová trať B

Pro vzduchovou trať B se provede podobné vyhodnocení. Na vzduchové trati B byla proměřena tlaková diference na cloně a na potrubí s připojeným kolenem o celkové měřené délce 2,2732 m. Měření probíhalo při teplotě vzduchu 15 °C. V Tabulka 2.2 jsou seřazeny naměřené a vypočítané hodnoty.

Otáčlav	Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty					
[s ⁻¹]	Δp_c [Pa]	Δp_t [Pa]	v_{sp} [m·s ⁻¹]	v_{sk} [m·s ⁻¹]	$\frac{Q_{v}}{[\mathrm{m}^{3}\cdot\mathrm{s}^{-1}]}$	<i>Re</i> _p [1]	Re_{k} [1]	
80	131	2700	12,10622	26,65636358	0,020119	38248,99	56756,57	
75	113	2370	11,19055	24,6401806	0,018598	35355,99	52463,72	
70	93,7	2080	10,12911	22,30301021	0,016834	32002,40	47487,44	
65	76	1790	9,061279	19,95178514	0,015059	28628,65	42481,22	
60	60	1500	7,990296	17,59361675	0,013279	25244,93	37460,22	
55	47	1260	7,016683	15,44984466	0,011661	22168,85	32895,72	
50	36	1036	6,088596	13,40631463	0,010119	19236,61	28544,64	
45	24	820	4,907033	10,80466357	0,008155	15503,52	23005,22	
40	13,9	650	3,669499	8,079770444	0,006098	11593,59	17203,40	
35	4,6	490	2,037333	4,485948559	0,003386	6436,85	9551,45	
30	2,5	350	1,472829	3,242983399	0,002448	4653,33	6904,94	

Tabulka 2.2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro geometrii B

Vyhodnocení pro trať s kolenem proběhlo podle následujících vzorců. Vzorový výpočet byl proveden pro maximální hodnotu průtoku vzduchu při otáčkách 80 s⁻¹.

Střední rychlost v potrubí v_{sp} byla určena z rovnice cejchovací křivky clony (viz Obrázek 2.9):

$$v_{\rm sp} = 0.9045 \cdot \Delta p_c^{0.5321} = 0.9045 \cdot 131^{0.5321} = 12,10622 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro výpočet střední rychlosti v koleně v_{sk} se nejprve musí určit místní ztráty pro zúžení dle vzorce (1.16) před vstupem do kolene ζ_1 a na počátku kolene před ohybem ζ_2 .

$$\zeta_1 = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{46^2}{31^2} - 1\right) \frac{46^2}{31^2} = 2,6464$$
$$\zeta_2 = 1 - \frac{S_2}{S_1} = 1 - \frac{31^2}{46^2} = 0,5458$$

Poté pro střední rychlost v koleně platí:

$$v_{sk} = \sqrt{\frac{\zeta_1}{\zeta_2} \cdot v_{sp}^2} = \sqrt{\frac{2,6464}{0,5458} \cdot 12,10622^2} = 26,656 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Objemový průtok je dán z rovnice kontinuity:

$$Q_v = v_s \frac{\pi d^2}{4} = 12,10622 \cdot \frac{\pi 0,046^2}{4} = 0,020119 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo pro proudění v potrubí a v koleně se vypočítá ze známého vztahu:

$$Re_{p} = \frac{v_{sp} d}{v} = \frac{12,10622 \cdot 0,046}{1,45595 \cdot 10^{-5}} = 38248,99$$
$$Re_{k} = \frac{v_{sk} d}{v} = \frac{26,656 \cdot 0,031}{1,45595 \cdot 10^{-5}} = 56756,57$$

kde ν je kinematická viskozita vzduchu, pro vzduch o teplotě 15°C je $\nu = 1,45595 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [3].

Závislost tlakové ztráty třením na objemovém průtoku pro měřený úsek potrubí se opět může zobrazit graficky a pomocí regrese lze stanovit typ a koeficienty funkční závislosti.



Obrázek 2.12 Graf závislosti tlakové ztráty potrubí na objemovém průtoku

V potrubí s připojeným kolenem vzniká další místní ztráta přímo v koleně. Tuto ztrátu lze odvodit z Obrázek 1.3, který je uveden v kapitole 1.2. K vyhledání hodnoty je nutné spočítat dle vztahu pro relativní poloměr zakřivení:

$$\frac{r}{d} = \frac{70}{31} = 2,26$$

kde *r* je poloměr zakřivení ohybu [mm] a *d* je průměr potrubí [mm]. Úhel zakřivení ohybu je 90°, takže místní ztráta pro koleno je $\zeta_k = 0,16$, dle Obrázek 1.3.

2.3.3 Shrnutí výsledků měření

Naměřené a vypočítané hodnoty byly shrnuty pro obě geometrie do grafů. Závislost tlakové ztráty měřeného úseku potrubí na rostoucím objemovém průtoku (Obrázek 2.10, Obrázek 2.12) má stoupající charakter, z čehož plyne, že čím větší průtok vzduchu bude proudit vzduchovou tratí, tím se zde budou objevovat větší tlaková ztráta třením.

Druhý graf u měření na vzduchové trati A (Obrázek 2.11) vykresluje závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle. Součinitel tření byl získán jak z měření, tak výpočtem dle Nikuradseho s Blasiova vzorce pro turbulentní proudění. Z grafu je patrné, že součinitel tření se stoupajícím Reynoldsovým číslem klesá.

U vzduchové trati s připojeným kolenem byly kromě tlakových ztrát propočítány i místní ztráty – na ohybu kolene $\zeta_k = 0,16$ a při vstupu do kolene – tedy na zúžení $\zeta_1 = 2,646, \zeta_2 = 0,5458.$

Shrnutí pojmů 2

Vzduchová trať slouží pro proměření třecích ztrát v potrubí kruhového průřezu. Skládá se z ventilátoru, který je poháněn elektromotorem. Ten je ovládán frekvenčním měničem, pomocí něhož lze měnit otáčky a tím i průtok. Za výstupem z ventilátoru následuje přímý úsek plastového potrubí, za nímž je umístěna clona jako průřezové měřidlo k určení velikosti průtoku vzduchu. Dále navazuje potrubí dle typu vzduchové tratě (A nebo B).

Clona je deska, jejíž otvor má menší průměr než je světlost potrubí. Vložením clony do potrubí se průtokový průřez zúží. Clona se používá pro měření střední rychlosti nebo průtoku.

Cejchovní křivka clony je křivka, pomocí níž lze z tlakového spádu na cloně určit průtok vzduchu v potrubí. Rychlost proudění je úměrná tlakovému spádu na cloně.

Otázky 2

- 1. Popište části vzduchové tratě.
- 2. Jaký je postup měření?
- 3. Jaké hodnoty při měření naměříme?

- 4. Co je to clona?
- 5. K čemu slouží cejchovní křivka clony?



Úlohy k řešení 2

- 1. Projděte si postup měření na experimentálním zařízení vzduchové trati.
- 2. Projděte si postup vyhodnocení měření a propočítejte vypočtené hodnoty dle uvedených vztahů alespoň pro tři různé průtoky.

3 TVORBA GEOMETRIE PRO NUMERICKÉ STANOVENÍ ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI

V této kapitole se stručně seznámíme s programem Autodesk Inventor, ve kterém byla vytvořena geometrie pro numerické měření ztrát na vzduchové trati, kap. 3.1. V další kap. 3.2 bude názorně předvedeno a vysvětleno, jak byly obě geometrie, pro vzduchovou trať A i B, vytvořeny.

3.1 Úvod do software Autodesk Inventor



Software Autodesk je americká společnost, která působí po celém světě. Nabízí až osm desítek produktů, a tím se řadí mezi největší výrobce softwaru na světě. Svými programy je schopen pokrývat všechny procesy navrhování, od 2D návrhů přes 3D modely. Celý vývoj společnosti lze rozdělit do tří období. Vše začalo v roce 1982, kdy se v bytě počítačového programátora Johna Walkera v Mill Valley scházelo 16 přátel s cílem založit novou softwarovou společnost. Každý z těchto lidí pracuje mimo jiné i v jiné počítačové firmě a tuhle nabídku přijímají k vyplnění svého volného času. Od každého se také očekávala vstupní investice 3000 dolarů. První pojmenování firmy neslo název Marin Software Partners. V dubnu roku 1982 byla společnost přejmenována již na název Autodesk.

Jedním z dalších důležitých osobností společnosti byl Mike Riddle. Po vystudování na univerzitě začal pracovat na grafickém program Interact. Ten byl posléze licencován Autodeskem, který si jej přejmenoval na MicroCAD a později na AutoCAD.

Za rok 1984 se prodalo již 10 tisíc kopií. Od tohoto roku se společnost začíná prezentovat jako CAD společnost. Od roku 1987 se již začíná prezentovat jako softwarová firma, jelikož předtím na burzu vstupuje společnost Microsoft.

Autodesk se dostává do dospělosti až díky vedení Carol Bartzové. Carol Bartzovou je možné považovat za prototyp manažera počítačových společností. Vystudovala počítačové vědy na Univerzitě ve Wisconsinu a v minulosti už působila v několika společnostech, mimo jiné jako viceprezident Sun Microsystems. Na setkání se zaměstnanci ji ve svém proslovu Walker podpořil s tím, že má jeho plnou podporu. Poté se stáhl do ústraní, aniž by chod společnosti ovlivňoval, a v roce 1994 ji nadobro bez většího ohlasu opustil. Carol si stanovila tři hlavní cíle, vytvořit z Autodesku společnost s obratem 1 miliardy dolarů, snížit závislost na AutoCADu a udat mu jasný cíl. [9]

3.1.1 Uživatelské prostředí programu Autodesk Inventor

V kapitole se stručně seznámíme s prostředím Inventoru a později si vytvoříme jednoduché geometrie vzduchového potrubí. Popis prostředí Inventoru je na Obrázek 3.1.



Obrázek 3.1 Uživatelské prostředí programu Autodesk Inventor

Pracovní prostředí se skládá z roletového menu, panelu nástrojů, pracovní plochy, nástroje potřebné pro tvorbu geometrie a strom použitých příkazů viz Obrázek 3.1.

Roletové menu a panel nástrojů plní standardní funkci jako u kteréhokoli jiného CAD software. Nacházejí se zde funkce pro správu vytvořených souborů, ale i nástroje potřebné pro vlastní tvorbu geometrie. V levé části se nacházejí nástroje potřebné pro tvorbu geometrie, jako je např. rotovaní tělesa, zaoblení hran atd. Pod těmito nástroji se nalézá strom s použitými příkazy. V jeho vrchní části jsou automaticky již před začátkem tvorby geometrie rozepsány jednotlivé roviny souřadného systému, kde si uživatel zvolí jednu z nich a na ní započne s náčrtem skici. Volba pracovní roviny je prvním krokem při náčrtu jakékoliv geometrie. Všechny kroky, které následně na skici udělá, se mu v tomto stromě promítnou postupně za sebou. Na pracovní ploše pak uživatel vidí geometrii, kterou vytváří, zobrazují se mu jednotlivé kroky, může si s geometrií natáčet a modifikovat její zobrazení.



Obrázek 3.2 Základní prostředí pro kreslení geometrie

Geometrie se kreslí jako tzv. Sketch (náčrtek), viz Obrázek 3.2. Ve zvolené rovině uživatel kreslí čáry, kružnice, obdélníky, oblouky, definuje si je kótami, zaobluje nebo sráží hrany atd. Náčrt se poté, až uživatel uzná, že je s prací na náčrtku hotov, ukončí a nastanou práce na modelu. Konečného modelu lze dosáhnout různými funkcemi, jako je např. vysunutí náčrtu, rotace náčrtu kolem zvolené osy apod.

Uživatelské prostředí tohoto programu výstižně popisuje Animace_3.1_Uživatelské prostředí programu Autodesk Inventor.

3.2 Vlastní tvorba geometrie



Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ↓ Vytvořit geometrii vzduchové tratě A i B.
- Používat všechny nástroje potřebné pro vytvoření geometrie.

Výklad

Vlastní tvorba geometrie je proces zcela jedinečný, existuje mnoho cest a způsobů, jak lze daný model vytvořit. Každý uživatel zběhlý v 3D modelování si vytvoří svůj vlastní postup, který bude aplikovat na tu či onu geometrii. V kap. 3.2.1 a kap. 3.2.2 je stručně

vysvětleno a popsáno, jak byla geometrie tvořena. Tento postup však nemusí být striktně dodržen a lze si jej upravit dle svého.

3.2.1 Tvorba geometrie A

Před začátkem kreslení geometrie si v Inventoru otevřeme prázdný dokument a pojmenujeme jej např. jako Air duct assembly. Vytvoříme si souřadný systém a v něm pracovní roviny. Ve Sketch 1 (pracovní náčrtek 1) si zvolíme rovinu, ve které budeme pracovat a poté začneme vytvářet první díl sestavy a tou je příruba. Nakreslíme si obdélník požadované velikosti dle výkresu a okótujeme jej. Pomocí příkazu *"Extrude"* vytáhneme obdélník o délku 5 mm. Na takto vytvořeném kvádru zaoblíme rohy. Velikost, o kterou se zaoblení provede, je 10 mm. Ve Sketch pomocí funkce *"Radius"* uděláme středy děr, které se budou nacházet v rozích geometrie příruby, vytvoříme kružnice a danou Sketch ukončíme. Vytvořené kružnice vytáhneme do požadované délky a tím vytvoříme díry. Poté opět ve Sketch do středu příruby pomocí funkce *"přidat geometrii"* přidáme kružnici o daném průměru a po návratu k modelu ji opět vytáhneme na požadovanou délku, 335 mm, tedy do vzdálenosti, ve které bude umístěna clona. Tento postup znázorňuje Animace_3.2_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě A1.

Pomocí funkce kreslení čar můžeme začít kreslit v ose potrubí obrys clony a následně okótovat na požadované rozměry. Jakmile jsou práce na náčrtu clony ukončeny, zavřeme danou Sketch. Jakmile je tedy vrchní část clony nakreslena a okótována, pomocí příkazu *"Revolve"* můžeme geometrii orotovat o úhel 270°. Tím nám vznikla clona navázaná na potrubí. Celý tento dílčí postup popisuje Animace_3.3_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě A2.

Poté, co máme vymodelovanou přírubu s kusem potrubí a clonu, lze přejít ke kreslení další části geometrie, kterou je samotné potrubí. K již vzniklé geometrii jsme tedy nakreslili kružnice o průměru potrubí a následně jsme tuto kružnici vytáhli do délky 2260 mm a poté jsme tomuto potrubí přidali tloušťku 2 mm. Tento závěr tvorby geometrie A zachycuje Animace_3.4_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě A3.

3.2.2 Tvorba geometrie B

Geometrii B jsme nakreslili stejně jako geometrii A. Její nákres se liší v tom, že ke konci potrubí je přidané koleno. Nákres tohoto kolene popisuje Animace_3.5_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě B1. Postup kreslení byl následující. Nejdříve jsme v ose potrubí nakreslili přímky kolmé na sebe. Poté jsme ohyb těchto dvou přímek zaoblili na potřebný rádius a zakótovali celé koleno, včetně vzdálenost k ohybu a od ohybu kolene. Na konci těchto přímek jsme nakreslili kružnici o průměru 35 mm a příkazem "*Sweep"* jsme plochu kružnice po dané přímce vytáhli a nakonec jsme zadali tloušťku potrubí, čímž se vytvořilo mezikruží.

Z těchto obou vymodelovaných geometrií byl vytvořen výkres, který schematicky zobrazuje Obrázek 3.3. Technický výkres v nezmenšené velikosti je v příloze této studijní opory. Tvorbou technické dokumentace provází Animace_3.6_Tvorba technické dokumentace geometrie vzduchové tratě A, B.



Obrázek 3.3 Schéma technického výkresu geometrie A, B

Shrnutí pojmů 3

Autodesk Inventor je software, který slouží k vytvoření 3D modelu nakreslením geometrie ve zvolených rovinách (sketch) a dále k vytvoření modelu některou z mnoha dostupných funkcí (vysunutí, rotace apod.). Je možné i vykreslení technického výkresu.

Sketch je náčrtek, ve kterém si uživatel pomocí jednoduchých příkazů (kreslit čáru, kružnici, obdélník) tvoří základnu modelu. Jakmile se sketch uzavře, tvoří se model.

Otázky 3

- 1. Jaký je obecný postup práce v software Autodesk Inventor?
- 2. Vyjmenujte několik základních funkcí, které byly použity při kreslení geometrie?



Úlohy k řešení 3

- 1. Projděte si uživatelské prostředí programu popsané v kap. 3.1.
- 2. Vytvořte geometrii vzduchové tratě A i B dle postupu v kap. 3.2.



CD-ROM

Postup tvorby geometrie v software Autodesk Inventor si může student prohlédnout v následujících animacích:

Animace_3.1_Uživatelské prostředí programu Autodesk Inventor

Animace_3.2_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě A1

Animace_3.3_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě A2

Animace_3.4_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě A3

Animace_3.5_Postup tvorby geometrie vzduchové tratě B1

Animace_3.6_Tvorba technické dokumentace geometrie vzduchové tratě A, B

4 TVORBA VÝPOČTOVÉ SÍTĚ PRO NUMERICKÉ STANOVENÍ ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI

V této kapitole se seznámíme s programem Ansys a jeho komponenty. V programu Ansys je možné počítat jak pevnostní výpočty, tak výpočty z oblasti proudění. Základem celého programu je prostředí Workbench, kde se volí daný typ výpočtu, který se bude používat. Tvoří se v něm jak geometrie, síťovaní tak samotný pevnostní nebo proudící výpočet. Ansys má spojitost s různými CAD systémy jako jsou Autodesk Inventor, CATIA, Solidworks, Pro/ENGENEERING a spoustu dalších.

Prostředí Workbench umožňuje modelovat více variant výpočtu a umožňuje tyto varianty výpočtů propojovat. Výpočty lze provádět na různých typech sítě, s definováním různých okrajových podmínek, viz Obrázek 4.1.



Obrázek 4.1 Schéma pracovního prostředí ve Workbench

Prostředí Workbench funguje na vzájemném propojování panelů, které si uživatel naskládá na pracovní plochu. Začíná se panelem *"Geometry"*, kde si uživatel buď nakreslí potřebnou geometrii, nebo importuje již vytvořenou v nějakém CAD programu. Následuje panel *"Mesh"*, v němž je možné různými způsoby danou geometrii vysíťovat. Dále navazuje panel *"FLUENT"*, kde se nastavuje a probíhá výpočet.
4.1 Úvod do software Ansys Meshing

Čas ke studiu: 15 minut

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Podat základní informace o tomto programu.
- Znát základní možnosti, které program nabízí.

Výklad

Ansys Meshing je software určený pro tvorbu sítě. Lze jej spustit jen z prostředí Workbench, je tedy nutné mít již připravenou geometrii, tzn. rozpracovaný projekt. Samotný program spustit nelze. Je zde možné generovat síť automaticky pro celý model, kdy se nastaví globální parametry a ty budou použity pro veškeré síťování modelu, případně lze kombinovat různé typy sítě. Pro složitější geometrie a pro dosažení odpovídající kvality sítě je zde rovněž možnost postupného síťování, kdy lze síťovat samostatně hrany, plochy a posléze objemy. Lze definovat různé rozložení buněk po hranách s určitým krokem, volit typ prvků, které budou vhodné k síťování. Tím lze dosáhnout různě husté a kvalitní sítě s různou velikostí elementů, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality sítě. Kvalitu sítě je pak možné vyhodnotit.

4.2 Uživatelské prostředí programu Ansys Meshing



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Orientovat se a pracovat v uživatelském prostředí programu Ansys Meshing.
- ↓ Definovat základní pojmy z oblasti uživatelského prostředí programu.

Výklad

Uživatelské prostředí programu Ansys Meshing lze rozdělit do několika základních částí: roletové menu, panel nástrojů (ikon), grafické okno (pracovní plocha), pracovní strom příkazů, okno s detaily k jednotlivým příkazům či objektům a popisové a příkazové okno, viz Obrázek 4.2. Všechny části pracovní plochy jsou popsány níže.

Veškeré příkazy se aktivují pomocí myši, té se také využívá k číselnému definování hodnot potřebných pro vysíťování geometrie. Jednotlivá okna zobrazená po zvolení příkazu se dají přesouvat po pracovní ploše tažením myší.



Obrázek 4.2 Uživatelské prostředí programu Ansys Meshing

Grafické okno (pracovní plocha)

Zobrazuje importované geometrie připravené k vysíťování a průběh celého procesu síťování. Kromě 3D a 2D geometrií se tu dále zobrazují např. grafy.

Roletové menu

Roletové menu obsahuje základní příkazy pro správu souborů a nastavení uživatelského prostředí programy. Jsou to příkazy jako "*File"*, "*Edit"*, "*View"*, "*Units"*, "*Tools"*, "*Help"*.

Panely nástrojů

Panely nástrojů se dělí na více jednotlivých lišt. Z těch základních je tu např. standardní lišta, která obsahuje často užívané příkazy, jako je vygenerování sítě *"Generate Mesh"*. Grafická lišta obsahuje příkazy, které provádí výběr příslušných entit – bodů, hran, ploch nebo objemů a zobrazují různé typy pohledů na model (rotace, posunutí, zobrazení do okna, na plochu atd.). V tzv. *"Context Toolbar"* se nacházejí příkazy, kterými uživatel mění typ síťování, obnovuje síť atd.

Pracovní strom příkazů

Vytváří určitý nástin celého projektu síťování. Zde se zobrazuje, které příkazy byly použity a v jakém pořadí. Lze tu přejmenovat objekty, ale hlavně tento strom poskytuje přístup k detailům příkazů či objektů, kde lze měnit jednotlivá nastavení potřebná pro vysíťování geometrie.

Okno s detaily k příkazům či objektům

Toto okno koresponduje s pracovním stromem. Celý systém funguje tak, že ve stromu si uživatel vybere jakoukoli položku a zde v okně s detaily se mu zobrazí veškeré informace o vybrané funkci. Lze tu např. měnit metody síťování, zadávat velikost buněk atd.

Popisové a příkazové okno

Představuje zpětnou vazbu pro uživatele, hlásí např. chybný postup, přidává tipy a informace o různých příkazech, které uživatel v rámci vytváření sítě použil.

4.3 Vlastní tvorba výpočtové sítě



V této kapitole bude vysvětleno síťování geometrie A a B.

4.3.1 Výpočtová síť pro geometrii A

V programu Workbench jsme si do pracovního okna natáhli prvek "*Geometrie"*. Poté jsme klinutím na geometrii pravým tlačítkem myši importovali námi vytvořenou geometrii v programu Inventor. Když byla geometrie načtena, přetáhli jsme do pracovního pole Workbench prvek, s názvem "*Mesh"*. Tento prvek jsme otevřeli a tím bylo otevřeno pracovní okno programu Ansys Meshing, do kterého se automaticky načetla geometrie potrubí. Obrázek 4.1 na začátku kap. 4 tento postup zobrazuje.

Tvorba samotné sítě započala kliknutím pravým tlačítkem myši na příkaz "*Mesh"*, který lze najít ve stromu na levé straně obrazovky, viz Obrázek 4.4



Obrázek 4.3 Výběr metody síťování

V dalším kroku je třeba zvolit metodu vhodnou k síťování. Ansys Meshing nabízí 5 metod pro síťování, viz Obrázek 4.3, jedná se např. o metodu *Automatic*, kde je síť generovaná automaticky (prvky sítě jsou různé). Další metodou je *Tetrahedrons* která vytvoří prvky trojúhelníkového tvaru, u této metody dále můžeme definovat velikost prvků, nejmenší a největší vzdálenost mezi jednotlivými body. Další metodou je metoda *Hexdominant*, zde je vytvořena síť pouze s prvky hex, *Sweep* a *Multizone*, kterou je vhodné použít, je-li možné síťovat všechny oblasti čistě hexahedral prvky.

Námi zvolená metoda byla Tetrahedrons, kde minimální velikost buněk byla 0,003 a algoritmus, dle kterého se počítalo, byl Patch Independent, Obrázek 4.5.



Obrázek 4.4 Vytváření samotné sítě

De	tails of "Patch Independent 2" - Metho	bd	Ą
Ξ	Scope		
	Scoping Method	Geometry Selection	
	Geometry	1 Body	
Ξ	Definition		
	Suppressed	No	
	Method	Tetrahedrons	
	Algorithm	Patch Independent	25-
	Element Midside Nodes	Use Global Setting	
Ξ	Advanced		metoda a
	Defined By	Max Element Size	algoritmus
	Max Element Size	Default	pro síťování
	Feature Angle	30,0 °	
	Mesh Based Defeaturing	Off	
	Curvature and Proximity Refinement	Yes	
	Min Size Limit	6,e-003 m	
	Num Cells Across Gap	Default	
	Curvature Normal Angle	Default 1	uinaini veiikosi
	Smooth Transition	Off	neĸ
	Growth Rate	Default	
	Minimum Edge Length	0,12566 m	
	Write ICEM CFD Files	No	

Obrázek 4.5 Definování vlastností sítě

Pokud je zvolena jak metoda, tak typ algoritmu, je možné provést samotnou generaci sítě. Kliknutím na tlačítko "*Generate Mesh*" se síť vytvoří. Uživatel si pak může zjistit, kolik má síť buněk a jaká je jejich kvalita, viz Obrázek 4.4. Jakmile je síť vytvořena a zkontrolována, geometrie i s touto výpočtovou sítí se vloží do Fluentu, kde je možné začít zadávat samotný výpočet.

4.3.2 Výpočtová síť pro geometrii B

Postup pro tvorbu výpočtové sítě na geometrii B je obdobný. V programu Workbench, se tahem myší do pracovního okna natáhne prvek s názvem *"Geometrie"*. Sem se kliknutím na geometrii pravým tlačítkem importuje námi vytvořená geometrie z programu Inventor. Pokud je geometrie načtena, přetáhne se pomocí tlačítka myši do pracovního pole prvek, s názvem *"Mesh"*. Tento prvek se otevře a tím se také otevře pracovní okno programu Ansys Meshing, do kterého se automaticky načte geometrie potrubí.

Postup síťování geometrie byl podobný jako u geometrie A. Opět byl zvolen typ síťování tak, aby splňoval daná kritéria kvalitní sítě, to znamená, aby hodnota velikosti buněk nebyla větší jak 0,9. Pro vysíťování geometrie potrubí s kolenem B byla zvolena metoda *"Tetrahedrons"*, která se řídí algoritmem Patch Independent. Minimální velikost buněk byla zvolena 0,008. Vygenerování sítě se opět provedlo tlačítkem *"Generage Mesh"* a síť byla následně převedena do Fluentu, kde je na ní nyní možné zadávat samotný výpočet.

Shrnutí pojmů 4

Ansys Meshing je software sloužící k vytvoření výpočtové sítě na modelu. Je možné generovat síť automaticky, případně kombinovat různé typy sítě. Lze definovat různé rozložení buněk po hranách, volit typ prvků, které budou vhodné k síťování, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality sítě.



Otázky 4

- 1. Jaké metody síťování jsou v Ansys Meshing dostupné?
- 2. Jaká je hodnota kvalitní sítě?
- 3. Co znamená síťování pomocí prvků Multizone?

Úlohy k řešení 4

- 1. Vytvořit výpočtovou síť na geometrii A.
- 2. Vytvořit výpočtovou síť na geometrii B.

CD-ROM

Seznámení se s programem Ansys Meshing a postup síťování geometrie A i B si může student prohlédnout v následujících animacích:

Animace_4.1_Uživatelské prostředí programu Ansys Meshing

Animace_4.2_Tvorba výpočtové sítě na geometrii A

Animace_4.3_Tvorba výpočtové sítě na geometrii B

5 NUMERICKÝ VÝPOČET ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI

Kapitola 5 se věnuje numerickému provedení experimentu proudění vzduchu v trubce. V podkapitole 5.1 nalezneme stručné seznámení s programem Ansys Fluent, v kap. 5.2 se seznámíme s jeho uživatelským prostředím. Následující kapitola 5.3 se již věnuje samotnému nastavení výpočtu pro konkrétní úlohu vzduchové trati.

5.1 Úvod do software Ansys Fluent



Popsat obecný postup práce v programu Fluent.

Výklad

Numerické modelování proudění je v dnešní době významným pomocníkem při návrhu či ověřování navržených parametrů strojů a zařízení v různorodých typech úloh – při proudění tekutiny v potrubních systémech nebo při návrhu čerpadla apod. Nespornou výhodou simulací je fakt, že lze nastavit různé okrajové podmínky pro určitý typ úlohy a ozkoušet jejich vliv na parametry proudění bez nutné potřeby fyzikálních experimentů. Proto je také numerických simulací proudění (CFD – Computional Fluid Dynamics) stále více využíváno ve všech oborech strojírenství. V dnešní době je na výběr široké spektrum výpočetního software (Fluent, CFX apod.).

Software Fluent pracuje metodou konečných objemů, danou úlohu lze řešit ve 2D i 3D geometriích, přičemž pro základní popis pohybu skutečné tekutiny je využito Navierových-Stokesových rovnic. Ansys Fluent je program, který svými fyzikální modely dokáže obsáhnout široké spektrum problémů, jako je proudění, turbulence, přenos tepla či vícefázové proudění. Tyto oblasti se samozřejmě nemusí týkat pouze strojírenství, ale i oblastí jako je zdravotnictví (tok krve), životního prostředí (šíření škodlivin) apod.

Software Ansys Fluent je integrován do prostředí Ansys Workbench, který poskytuje uživatelům propojení všech běžně používaných CAD systémů, efektivní tvorbu geometrie v programu Ansys DesignModeler a také pokročilé techniky síťování v programu Ansys Meshing (kap. 4).

Ansys Fluent je možné spustit z prostředí Ansys Workbench, kde lze vybrat buď panel, který obsahuje všechny potřebné komponenty (geometrii, síť, výpočet a řešení) – v tomto případě bude program Fluent požadovat návaznost na geometrii a síť, anebo lze vybrat pouze panel s výpočtem a řešením (Fluent), kde po spuštění Fluentu můžeme importovat již vytvořenou vysíťovanou geometrii (Obrázek 5.1 vlevo). Také je možné spustit

Fluent přímo z nabídky Start – Programy – Ansys 14.0 (13.0) – Fluid Dynamics – FLUENT 14.0 (13.0), viz Obrázek 5.1 vpravo.



Obrázek 5.1 Spuštění programu Ansys Fluent 14.0 v systému Windows 7, vlevo – z prostředí Workbench, vpravo – z nabídky Start

Po výběru některé z cest ke spuštění Fluentu a kliknutím na "*Setup*" v prvním případě a na "*FLUENT 14.0*" v případě druhém, se program spustí a otevře se okno "*FLUENT Launcher*" (Obrázek 5.2), kde se definují základní parametry pro výpočet:

- "Dimension" umožňuje nastavit, zda bude výpočet probíhat ve 2D nebo 3D,
- "Options" položka "Double Precision" nastaví výpočet s vyšší přesností,
- "Processing Options" zde je možné zvolit, zda bude výpočet probíhat na jednom ("Serial") nebo více ("Parallel") výpočetních jádrech počítače. Paralelní výpočet je vhodný pro složitější geometrie, kdy lze zcela využít potenciálu počítače a zkrátit tak výpočetní čas.
- "*Working Directory*" lze nastavit pracovní adresář, do kterého se budou výsledky ukládat,
- "FLUENT Root Path" kmenový adresář programu Ansys Fluent.

Po nastavení všech potřebných informací se volba potvrdí tlačítkem "*OK*" a program Fluent se spustí. Představení uživatelského prostředí a základních funkcí programu Fluent je v následující kapitole 5.2.

FLUENT Launcher	
ANSYS	FLUENT Launcher
Dimension 2D 3D Display Options Display Mesh After Reading Embed Graphics Windows Workbench Color Scheme	Options
General Options Parallel Settings Version 14.0.0	Scheduler Environment
Working Directory D:\ FLUENT Root Path C:\PROGRA~1\ANSYSI~1\v140\ftu Use Journal File	uent 💽 📴
<u> </u>	ault <u>C</u> ancel <u>H</u> elp v

Obrázek 5.2 Spouštěcí okno FLUENT Launcher

5.1.1 Obecné schéma postupu práce v programu Ansys Fluent

Základní schéma obecného postupu tvorby numerické simulace spočítá ve třech základních pojmech: *preprocess*, neboli příprava úlohy pro numerický výpočet, *process* – samotný výpočet a *postprocess* – vyhodnocení výsledků numerické simulace. Celý proces lze stručně popsat těmito body:

- Prvním krokem je načtení připravené výpočetní sítě, např. z programu Ansys Meshing, Gambit apod.
- Následně je třeba definovat matematický model odpovídající typu řešené úlohy (např. jednofázový model, model turbulence, vícefázový model atd.), fyzikální vlastnosti jednotlivých proudících médií, okrajové a počáteční podmínky.
- Dalším krokem je nastavení vlastností řešiče (relaxační parametry, diskretizační schémata atd.).
- Poté se provede inicializace řešení, která úloze nastaví nadefinované podmínky. Všechny tyto body zatím patřily to tzv. *preprocessingu*.
- Poté se již provede numerický výpočet tedy process.
- Po zdárně ukončeném výpočtu nastává čas pro *postprocessing*, kde se vyhodnotí výsledky numerické simulace.

5.2 Uživatelské prostředí programu Ansys Fluent



Výklad

Uživatelské prostředí programu Ansys Fluent lze rozdělit do pěti částí: roletové menu, panel nástrojů (ikon), grafické okno (pracovní plocha), definiční nástroje a popisové a příkazové okno (konzole), viz Obrázek 5.3. Všech pět položek je popsáno níže.

Veškeré příkazy se aktivují pomocí myši nebo klávesnice, té se také využívá k číselnému definování hodnot potřebných pro výpočet. Jednotlivá okna zobrazená po zvolení příkazu se dají přesouvat po pracovní ploše tažením myší.

Parallel FLUENT@Baru	inka-PC [3d, dp, pbns, lam]			and the second se					
File Mesh Define So	Ive Adapt Surface Display Report Parallel V	iew Help	Polotová mon	-					
		Window 1	Koletove ment						
Problem Setup Seneral Models Materials Phases Cell Zone Conditions	Mesh Scale Check Report Quality Display				tionesenter/df vo				
Boundary Conditions Mesh Interfaces Dynamic Mesh Reference Values Solution	Solver Type Velocity Formulation Pressure-Based Absolute Density-Based Relative			0-1-7-1					
Solution Methods Solution Controls Monitors Solution Initialization	Time Steady Transient								
Calculation Activities Run Calculation	Gravity Units								
Graphics and Animations Plots Reports	Help								
Definič	ní nástroje		Ŀ						
		ID Conm. Hostname	e O.S. PID	Mach ID HW ID Name					
		host* net Barunka- n0 pcmpi Barunka-	-PC Windows-x64 2076 -PC Windows-x64 2508	0 -1 Fluent Host 0 396 Fluent Node	Popisové a příkazové okno				
		Cleanup script file is	D:\\cleanup-fluent-Barunka						
		ANSVS, Inc. makes no co prototype version. How quality of the product.	rsion that has not yet been mmitment to resolve defect wever, your feedback will h	tested and validated. s reported against this elp us improve the overall					
		>							

Obrázek 5.3 Uživatelské prostředí programu Ansys Fluent

Grafické okno (pracovní plocha)

Zobrazuje importované vysíťované modely, výsledky numerické simulace, průběh reziduál, průběh snímání různých veličin v monitorovacích bodech atd.

Popisové a příkazové okno (konzole)

Při načtení programu je zde zmínka o akademické verzi a také o počtu jader, na kterých bude výpočet probíhat. Pokud se při spuštění vyskytne nějaká chyba, uživatel se to dozví právě z tohoto okna. Dále okno slouží k výpisu informací o všech provedených příkazech, zobrazení informativních zpráv a k zadávání textových příkazů.

Roletové menu

Obsahuje klasickou nabídku pro správu souborů a všechny příkazy potřebné k nadefinování úlohy a zobrazení výsledků řešení, z nichž některé příkazy jsou osazeny v definičních nástrojích.

Panel nástrojů

Poskytuje uživateli snadný přístup k nejpoužívanějším funkcím programu. Pokud se uživatel myší zastaví nad jednotlivými ikonami, zobrazí se mu jejich název, který dává tušit funkci ikony.

Definiční nástroje

Panel obsahuje všechny nástroje potřební k práci na nastavení úlohy v programu Fluent, jako je např. definování modelu, okrajových podmínek, materiálových vlastností, parametrů řešiče atd. a nabízí k nim rychlý přístup.

Po spuštění programu je řada položek neaktivní, protože není načtena žádná výpočetní síť. I tak si ale v následujících podkapitolách můžeme vysvětlit funkci jednotlivých příkazů.

Ansys Fluent pracuje se dvěma formáty souboru – ***.cas** a ***.dat**. Soubor formátu *.cas obsahuje nastavení matematického modelu, soubor formátu *.dat obsahuje výsledky numerické simulace.

5.2.1 Roletové menu programu Ansys Fluent

V této podkapitole budou popsány jednotlivé funkce příkazů, které lze zvolit z roletového menu. Roletové menu, viz Obrázek 5.4, nabízí mnoho položek, které jsou systematicky rozděleny dle jejich funkce. Některé příkazy jsou dostupné i z panelu definičních nástrojů.

File Mesh Define Solve Adapt Surface Display Report Parallel View Help

Obrázek 5.4 Roletové menu programu Ansys Fluent

"*File"* – položka zaměřena na správu souborů. Patří sem příkazy jako "*Read"* – načtení sítě či souboru s nastavením výpočtu, "*Write"* – uložení souboru s nastaveným výpočtem, s výsledky simulace či nastavení automatického ukládání. V příkazu "*Import"* (popř. "*Export"*) je uvedena celá řada formátů souborů, které je program schopen importovat. Jedná se o soubory z programů jako je CFX, Gambit, NASTRAN atd. Dále je v této položce možné nastavit ukládání grafických výstupů pořízených v grafickém okně ve formě obrázků ("*Save Picture"*). Na konci položka obsahuje příkaz "*Exit"* pro opuštění programu.

"Mesh" – položka nabízí informace o výpočtové síti a obsahuje nástroje k práci se sítí. Na výběr je informace o kvalitě sítě, o počtu buněk, možnost slučování nebo rozdělení jednotlivých oblastí, změna velikosti oblasti, posun, rotace oblasti atd.

"Define" – položka obsahuje základní nástroje k definování všech parametrů potřebných pro výpočet. Lze definovat, zda bude úloha časově závislá či závislá na tíhovém zrychlení ("General"), dále se zde volí vhodný matematický model pro výpočet ("Models"), materiály, tedy proudící média ("Materials"), u vícefázového proudění je třeba přiřadit jednotlivá média k fázím ("Phases"). Další nabídka umožní definovat, jaký typ oblasti budeme u výpočtu uvažovat, zda "fluid" nebo "solid" ("Cell Zone Conditions"), v položce "Boundary Conditions" definujeme typy okrajových podmínek na příslušných hranicích výpočetní oblasti. Položka "Operating Conditions" umožní nastavit hodnotu a polohu operačního tlaku. Důležitou položkou v této nabídce je "User-Defined", kde máme možnost načíst a kompilovat uživatelsky definované funkce (UDF).

"Solve" – v položce lze definovat parametry řešiče a zároveň spustit samotnou numerickou simulaci.

"Adapt" – tato nabídka umožňuje adaptaci neboli zhuštění výpočetní sítě pomocí různých kritérií. Je možné adaptovat např. pomocí "Boundary", kdy příkaz bude síť adaptovat podle zvolené hranice (zvolí se počet buněk, které chceme mít zhuštěny, od určité hranice). Dále je v nabídce příkaz "Gradient", který umožňuje adaptaci výpočetní sítě pomocí počítaných veličin (např. v místech velkých gradientů jakékoli veličiny). Příkaz "Region" umožní adaptaci v oblasti zadané pomocí rozměrů, např. krychle. Příkaz "Manage" umožňuje náhled na oblast, která je vybrána k adaptaci.

"Surface" – v této položce lze vytvářet různé entity (body, úsečky, plochy), na kterých se následně vyhodnocují počítané veličiny. Také lze měnit různé atributy těchto vytvořených entit.

"*Display*" – obsahuje nástroje k zobrazení a vyhodnocení počítaných veličin v konturách či vektorech (např. tlak, rychlost, teplota, hustota, podíl fází atd.), položka "*Graphics and Animations*". Tyto veličiny lze také zobrazit v grafech nebo lze provést FFT analýzu pro dynamické děje, položka "*Plots*". Dále je možné zobrazit reziduály proběhlého výpočtu ("*Residuals*"). Ke konci tohoto menu jsou příkazy k definování zobrazení grafického okna ("*Options*", "*Views*", "*Lights*" atd.).

"Report" – zde lze vyhodnotit např. střední hodnoty veličin na definovaných okrajových podmínkách, hmotnostní průtoky nebo hustoty hmotnostního průtoku skrz příslušnou entitu (plocha, okrajová podmínka), síly v příslušných směrech souřadného systému atd. Dále lze získat informace o kompletním nastavení výpočetního modelu nebo změnit referenční parametry.

Pomocí položky "*Parallel*" lze realizovat výpočet na více výpočetních jádrech. Nástroj je vhodný zejména u složitých 3D výpočetních oblastí s velkým počtem buněk, kdy lze tzv. paralelizací výpočtu využít kapacitu výpočetní stanice.

"View" – v této položce nalezneme volbu pro potlačení zobrazení jednotlivých nástrojů a rozvržení pracovní plochy.

"*Help"* – v položce lze vyhledat nápovědu pro jednotlivé funkce programu.

5.2.2 Funkce dostupné z panelu nástrojů programu Ansys Fluent

V této podkapitole budou popsány jednotlivé funkce příkazů, které lze zvolit z panelu nástrojů, viz Obrázek 5.5. Panel nástrojů poskytuje uživateli snadný přístup k základním, hojně užívaným funkcím programu Ansys Fluent a lze jej rozdělit na dvě oblasti, *"Standard Toolbar"* a *"Graphics Toolbar"*.

📷 🗸 📓 🖉 💽 🕂 🕄 🗶 🗶 🥒 📜 📜 🖛

Obrázek 5.5 Panel nástrojů programu Ansys Fluent

"Standard Toolbar" obsahuje příkazy jako *"Read a File"* a *"Write a File"*, kde dojde k otevření souboru a následně uložení dat. Dále je zde ikonka *"Save Picture"*, která umožní vytvořit obrázek z právě aktivního grafického okna. Poslední nabídkou v této části je *"Help"*, kudy může uživatel přejít k manuálům a tedy k nápovědě pro jednotlivé funkce programu.

"*Graphics Toolbar*" obsahuje nabídky, které uživateli umožní měnit pohled na model nebo na vybrané části objektů v grafickém okně. Na výběr je rotace ("*Rotate View*"), posun ("*Pan*"), přiblížení a oddálení objektu držením levého tlačítka myši a posouváním myší nahoru a dolů ("*Zoom In/Out*"), přiblížení vybraného okna ("*Zoom to Area*"). Dále lze vybírat části modelu a zobrazovat o nich informace ("*Print information about selected item*") a zobrazit model v grafickém okně na maximum jeho velikosti ("*Fit to Window*"). Ke konci panelu je možné zobrazit model v různých pohledech, uspořádat pracovní plochu dle svého a specifikovat počet a rozvržení grafických oken na pracovní ploše.

5.2.3 Funkce dostupné z panelu definičních nástrojů programu Ansys Fluent

Panel definičních nástrojů se dělí na dvě části – levá část "*Navitagion Pane"*, tzv. "*navigační okno či tabulka"*, pravá část "*Task Page"*, tzv. "*okno úloh, úkolů"*, viz Obrázek 5.6. Nástroje v navigačním okně jsou systematicky seřazeny za sebou tak, jak postupuje proces definování dané úlohy. Příkazy se dělí na tři oblasti, z nichž každá má několik dalších podoblastí. V části pravé, v okně úloh, se zobrazují příslušná okna pro volbu vstupních a okrajových podmínek. Je možné, že pokud uživatel zvolí nějakou nabídku z tohoto okna, program odpoví dalším *dialogovým oknem*, kde se např. zadávají hodnoty, vybírají plochy atd.

- "Problem Setup" zde nalezneme výběr nejpoužívanějších příkazů z nabídky příkazu "Define" v roletovém menu. Tato část příkazů tedy obsahuje základní nástroje k definování všech parametrů potřebných pro výpočet (model, materiály, fáze, okrajové podmínky atd.).
- "*Solution"* nabídka je stejná jako u příkazu "*Solve"* v roletovém menu. Tato oblast tedy obsahuje příkazy pro definování parametrů řešiče numerické simulace.
- "Results" zde nalezneme výběr nejpoužívanějších příkazů z nabídky příkazu "Display" a "Report" v roletovém menu. Jedná se tedy o možnosti vyhodnocení výsledků a způsob jejich zobrazení.

Problem Setup	General						
General	Mesh						
Models Materials Phases Cell Zone Conditions Boundary Conditions	Scale Check Report Quality Display						
Mesn Interfaces Dynamic Mesh Reference Values	Type Velocity Formulation Pressure-Based Absolute Density Passed Density Passed Density Passed						
Solution	O Density-based O Relative						
Solution Methods Solution Controls Monitors Solution Initialization Calculation Activities Run Calculation	Time Steady Transient Gravity Units						
Results							
Graphics and Animations Plots Reports	Help						

Obrázek 5.6 Definiční nástroje programu Ansys Fluent

Funkce všech nabídek a příkazů uváděných v této kapitole je podrobně popsána v literatuře [7].

5.3 Nastavení výpočtu v software Fluent



V kapitole bude vysvětleno, jak byla úloha pro proudění vzduchu potrubím nastavena, jakých příkazů se použilo při volbě příslušného modelu a při zadávání okrajových podmínek.

5.3.1 Nastavení výpočtu pro proudění vzduchu v potrubí o geometrii A

Prvním krokem je import výpočtové sítě do programu Ansys Fluent. V prostředí Workbench (viz Obrázek 4.1) se za blok se síťováním přidá panel Fluentu a otevře se. Síť bude automaticky přenesena a zobrazena v prostředí programu Fluent, viz Obrázek 5.7.



Obrázek 5.7 Síť importovaná do programu Ansys Fluent

Je vhodné nejprve zkontrolovat rozměry dané sítě. Kontrola se provede výběrem příkazu "*Mesh*" z hlavní lišty roletového menu a poté volbo příkazu "*Scale*…", kde lze zjistit velikost sítě, tedy v jakých jednotkách se sít importovala, viz Obrázek 5.8. Pokud bude mít síť zvoleny jiné rozměry, než je třeba, lze její velikost změnit např. změnou milimetrů na metry či opačně dle toho, v jakých rozměrech byla geometrie nakreslena.

Mest	n Define	Solve Adap	t Surface	Display	Report Paralle	l Viev	v Help			
	Check			💽 Sca	le Mesh				23	Ì
	Info		+	Domain	i Extents				Scaling	
	Polyhedra		•	Xmin ((m) 0		Xmax (m)	2.6387	Convert Units Specify Scaling Factors	
	Merge			Ymin ((m) -0.02675		Ymax (m)	0.02675	Mesh Was Created In	
	Separate		+	Zmin ((m)		Zmay (m)	[<select></select>	
	Fuse			2000	-0.02675		zinax (iii)	0.02675	Scaling Factors	
	Zone		•	View Le	ength Unit In			N	× 1	
	Replace			m		•		\sim	Y 1	
	Reorder		+				Kont	rola rozměrů		
	Scale] 🦷						۷ ا	
	Translate		$ \setminus$						Scale Unscale	
	Rotate	Výt	oěr příka	zu						_
	Smooth/Sw	ар	-				C	ose Help		
	Recorded M	lesh Oneratio	ns							

Obrázek 5.8 Kontrola rozměrů importované sítě

První rozhodnutí, které musí uživatel provést, je, zda bude výpočet probíhat závisle či nezávisle na čase a zda se při výpočtu bude uvažovat gravitace. Nabídku "*General"* lze najít v definičních nástrojích a je to první nabídka, která se objeví při otevření programu Fluent. V našem jednoduchém případě není třeba volit výpočet závislý na čase, je tedy zvolena možnost "*Steady"* výpočtu, a je možné zanedbat gravitaci, takže volba "*Gravity"* není zaznačena, viz Obrázek 5.9

General		
Mesh		
Scale	Check	Report Quality
Display		
Solver		
Туре	Velocity Fo	rmulation
Pressure-Based	 O Absolut O Relative 	e -
	0.000	-
Time		
Steady Transient		
Gravity		Units

Obrázek 5.9 Základní volba typu výpočtu

Zásadní volbou pro korektní výpočet je definování správného modelu pro daný typ úlohy. To lze provést výběrem příkazu *"Models…"* v roletovém menu *"Define"* nebo v panelu definičních nástrojů výběrem příkazu *"Models"*. V pravé části definičních nástrojů se zobrazí tabulka s dostupnými modely, viz Obrázek 5.10.

Models
Models
Multiphase - Off Energy - Off Viscous - Standard k-e, Standard Wall Fn Radiation - Off Heat Exchanger - Off Species - Off Discrete Phase - Off Solidification & Melting - Off Acoustics - Off
4 III >
Edit

Obrázek 5.10 Modely dostupné v programu Ansys Fluent

Z experimentálního měření bylo zjištěno, že se v potrubí při proudění vzduchu jedná o turbulentní proudění, proto volíme viskózní dvourovnicový turbulentní model k- ε Standard se zvolenou standardní stěnovou funkcí. Přednastavené hodnoty lze ponechat, jak je uvedeno na Obrázek 5.11.

Model	Model Constants	
 Inviscid Laminar Spalart-Allmaras (1 eqn) k-epsilon (2 eqn) k-omega (2 eqn) Transition k-kl-omega (3 eqn) Transition SST (4 eqn) Reynolds Stress (7 eqn) Scale-Adaptive Simulation (SAS) Detached Eddy Simulation (DES) Large Eddy Simulation (LES) 	Cmu 0.09 C1-Epsilon 1.44 C2-Epsilon 1.92 TKE Prandtl Number 1	
 Standard RNG Realizable 	User-Defined Functions Turbulent Viscosity none	
 Standard Wall Functions Non-Equilibrium Wall Functions Enhanced Wall Treatment User-Defined Wall Functions 	TKE Prandtl Number TKE Prandtl Number TDR Prandtl Number none	*
		Ŧ

Obrázek 5.11 Zvolený turbulentní model k-ɛ Standard s předdefinovanými hodnotami

Po potvrzení tlačítkem "*OK*" je model definován. Dále je třeba zadat materiál, neboli médium, které bude v daném potrubí proudit a následně okrajové podmínky nutné pro výpočet. Volbu média lze provést příkazem "*Materials*" z panelu definičních nástrojů.

Proudící médium vybíráme z nabídky "*Fluid*", kde je předdefinován vzduch – "*air*". Tlačítkem "*Create/Edit*…" lze vybrat označené médium a podívat se do tabulky s fyzikálními vlastnostmi média, viz Obrázek 5.12. U vzduchu je zobrazena hodnota hustoty a dynamické viskozity. Vzduch byl zvolen jako nestlačitelný, tudíž hodnoty hustoty a dynamické viskozity byly zadány jako konstanty platné pro teplotu vzduchu 15°C.

Pokud by bylo potřeba zvolit jiné médium, lze výběr provést z databáze Fluentu ("FLUENT Database…").

Materials	💶 Create/Edit Mat	erials			×
Materials Fluid air Solid aluminum	Name air Chemical Formula		Material Type [fluid FLUENT Fluid Materials air	•	Order Materials by Image: Name Image: Chemical Formula FLUENT Database
			Mixture none		User-Defined Database
	Properties Density (kg/m3) Viscosity (kg/m-s)	constant 1.225 constant 1.7894e-05	Edit	E	
Help		Change/Create	Delete Close	- Help	

Obrázek 5.12 Volba materiálu – proudícího média

Nyní je již možné definovat okrajové podmínky. Jednou z nich je okolní provozní tlak, který lze nastavit v nabídce "*Operating Conditions*…". Nabídka se nachází v roletovém menu "*Define*". Provozní tlak byl definován jako atmosférický tlak hodnotou 101325 Pa, viz Obrázek 5.13.

Operating Conditions	— ×
Pressure	Gravity
Operating Pressure (pascal)	🔲 Gravity
101325	
Reference Pressure Location	
X (m) 0	
Y (m) 0	
Z (m) 0	
OK Cancel Hel	>

Obrázek 5.13 Nastavení provozního tlaku

Všechny okrajové podmínky nutné pro výpočet jsou znázorněny na Obrázek 5.14. K definování okrajových podmínek lze dojít opět cestou přes roletové menu příkazem *"Define"* a poté *"Boundary Conditions"*, nebo stejným příkazem (*"Boundary Conditions"*) přímo v definičních nástrojích.

🗳 e-rtup	AL LITHING TAR	phris, ske]	(ANSYS Academic Research C	FD]	Yelacity Inlet			8	
File Mesh	General	pt Sunface	Deplay Report Parallel View H 後、久 間・日・	rip.	Zone Name Inlet		1		
Problem Set	Materials		oditions	112	Momentum Thermal Radiation Specie	s CFM Multiphase	uos		
General Models	CeltZone Condition	rs			Velocity Specification Method	Magnitude, Normal to B	oundary	~	
Phases -	Operating Condition	78	piece_assembly_without_ebow		Reference Frame	Absolute		~	
Cell Zone	Med-Interfaces	1	ce_assembly_without_ebow		Velocity Magnitude (m/s)	25.25	constant	*	
Dynamic # Reference	Mesh Norpher/Opt Mixing Planes	tmizer	to the work without a town of the second sec		Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	0	constant	M	
Solution N	Turbo Topology	6	Definování		Specification Method	Intensity and Hydraulic D	ianeter		
Solution C Monitors	0.0404 P.m/s		derniovani			Turbulent Inten	aty (%) 5		
Solution II Calculatio	Shell Conduction 9 Custom Field Fund	tions	okrajových			Hydraulic Dians	ater (m) 0.046		*
Results Graphics (Parameters Profiles Units		podilines			Carcel (Heb	1		Definování
Reports	User-Defined	•	pressure-outlet	I	Pressure Outliet			×	vstupnich
		E.G	Copy Profiles		Zone Name		1		podminek
		play Mesh	Fernde Conditions	Condition	Momentum Thermal Radiation Spec	uos			
					Gauge Pressure (pascal)	0	constant		
	Hel	Ð			Backflow Direction Specification Method Nort	Normal to Boundary			
				M	Radal Equilbrium Pressure Distribution Average Pressure Specification Target Mass Flow Rate	n			ANSYS FLUENT 13.0
					Turbulence			100	Definování
					Specification Method p	ntensity and Hydraulic Di	anotar Pri (M.)	~	nodminek na
				be		Badiflow Hydraulic Diane	ter (n) 0.045	-1	výstupu
				Pro				_	
				Do		C. Cancel Help	0		

Obrázek 5.14 Nastavení okrajových podmínek

Zvolením příkazu "*Boundary Conditions*" se dostaneme do tabulky se všemi zónami definovanými v síti již při síťování geometrie. Nachází se tu vstup – "*inlet*", výstup – "*outlet*", stěny – "*wall*", vnitřek potrubí – "*interior*". Okrajové podmínky se musí definovat pro každou položku v seznamu zvlášť.

Pro vnitřek potrubí *"interior"* se žádné číselné parametry nedefinují, pouze se zde přiřadí správný typ zóny.

Na vstup, který je pojmenovaný jako *"inlet"*, byla přiřazena rychlostní vstupní podmínka *"velocity-inlet"*. Tlačítkem *"Edit"* lze vstoupit do dialogového okna na Obrázek 5.15, kde je možné nadefinovat různé parametry. Zadává se zde rychlost proudění, která byla zvolena dle fyzikálního experimentu 48,08 m·s⁻¹, což odpovídá rychlosti proudění vzduchu v potrubí při 80 ot·s⁻¹. Dále se v této okrajové podmínce kvůli turbulentnímu modelu *k-ε* volí další veličiny jako je intenzita turbulence 5 % a hydraulický průměr 0,046 m, který v tomto případě odpovídá průměru potrubí.

💶 Velocity Inlet		— ×		
Zone Name				
inlet				
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS				
Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary				
Reference Frame Absolute				
Velocity Magnitude (m/s)	48.08	constant 👻		
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	0	constant 💌		
Turbulence				
Specification Method I	ntensity and Hydraulic Diam	eter 🗸		
Turbulent Intensity (%) 5				
Hydraulic Diameter (m) 0.046				
OK Cancel Help				

Obrázek 5.15 Definování rychlostní okrajové podmínky na vstupu

Na výstup, který je pojmenovaný *"outlet"*, byla přiřazena tlaková okrajová podmínka *"pressure-outlet"*, viz Obrázek 5.16. Zde se definovala opět intenzita turbulence 5 % a hydraulický průměr 0,046 m.

💶 Pressure Outlet 📃
Zone Name
outlet
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Gauge Pressure (pascal)
Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary
Radial Equilibrium Pressure Distribution Average Pressure Specification
Target Mass Flow Rate
Turbulence
Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter
Backflow Turbulent Intensity (%) 5
Backflow Hydraulic Diameter (m) 0.046
OK Cancel Help

Obrázek 5.16 Definování tlakové okrajové podmínky na výstupu

Zbývá ještě definovat okrajovou podmínku na stěně. Ke stěně se tedy přiřadí typ okrajové podmínky "*wall*" a tlačítkem "*Edit*" opět můžeme měnit různé parametry na stěně, viz Obrázek 5.17. Lze definovat pohyb stěny, ale protože stěna se v našem případě nijak nepohybuje, volíme "*Stationary Wall*". Další možnou volbou je zadání určitého smykového napětí na stěně, což by změnilo míru smáčivosti stěny. V tomto případě však předpokládáme klasickou smáčivou stěnu s podmínkou nulové rychlosti na stěně a volíme tedy podmínku "*No Slip*". Ještě je možné definovat hrubost stěny, zde nemáme žádné specifické požadavky, takže lze ponechat předdefinované konstanty.

💽 Wall			
Zone Name			
wall-part-one_piece_assembly_without_elbow-part-solid			
Adjacent Cell Zone			
part-solid			
Shadow Face Zone			
wall-part-one_piece_assembly_without_elbow-part-solid-shadow			
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS			
Wall Motion Motion			
Stationary Wall Relative to Adjacent Cell Zone Moving Wall			
Shear Condition			
 No Slip Specified Shear Specularity Coefficient Marangoni Stress 			
Wall Roughness			
Roughness Height (m) 0 constant			
Roughness Constant 0.5 constant			
OK Cancel Help			

Obrázek 5.17 Definování okrajové podmínky na stěně

Po zadání všech potřebných informací je možné provést spoustu kroků pro snadnější budoucí vyhodnocení výpočtu – připravit si vyhodnocovací roviny, snímat monitory veličin, které mohou být zajímavé, připravit nahrávání animace, zkontrolovat relaxační parametry, zvolit jinou výpočetní metodu, řád přesnosti výpočtu atd.

Jakmile je vše přichystáno, je třeba úlohu zinicializovat. Inicializací se všechny navolené parametry nastaví a dle nich bude výpočet probíhat. V definičních nástrojích se zvolí nabídka *"Solution Initialization"* (nebo v roletovém menu *"Solve"* příkaz *"Initialization"*) a přejde se do okna, kde lze navolit jednotlivé parametry, viz Obrázek 5.18. Může být zadána rychlost ve směru proudění, tím by se výpočet urychlil, proudící médium by již mělo určitou rychlost a výpočet by nepočítal od nuly, dále provozní tlak, hodnota

turbulentní kinetické energie a disipace a teplota. Inicializace se poté provede tlačítkem *"Initialize"*.

Solution Initialization	
Initialization Methods	
 Hybrid Initialization Standard Initialization 	
Compute from	2
Reference Frame	
 Relative to Cell Zone Absolute 	
Initial Values	
Gauge Pressure (pascal)	^
0	
X Velocity (m/s)	
0	
Y Velocity (m/s)	
0	
Z Velocity (m/s)	
0	
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	
1	
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	
1	Ŧ
Initialize Reset Patch	
Reset DPM Sources Reset Statistics	

Obrázek 5.18 Inicializace úlohy

Po inicializaci se již může nastavit spuštění výpočtu, opět buď z roletového menu "*Solve*" příkazem "*Run Calculation*" nebo přímo z definičních nástrojů. V okně na Obrázek 5.19 lze zadat počet iterací, např. 1000. Výpočet buď bude probíhat po tento zadaný počet iterací, nebo se, pokud dojde ke zkonvergování úlohy, ukončí dříve. Spuštění výpočtu se provede tlačítkem "*Calculate*".

Run Calculation	
Check Case	Preview Mesh Motion
Number of Iterations	Reporting Interval
Profile Update Interval	
Data File Quantities	Acoustic Signals
Calculate	

Obrázek 5.19 Spuštění výpočtu

Zatímco výpočet probíhá, grafické okno zobrazuje reziduály. Ty jsou mírou konvergence, představují maximum rozdílu dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě ve dvou po sobě následujících iteracích. Jsou vyhodnocovány pro všechny počítané veličiny v každém kroku iterace. Snižující se hodnota reziduálu vypovídá o dobře konvergující úloze.

5.3.2 Nastavení výpočtu pro proudění vzduchu v potrubí o geometrii B

Nastavení výpočtu pro geometrii B se provede stejným způsobem jako u geometrie A jen s tím rozdílem, že u rychlostní podmínky na vstupu se zadá vstupní rychlost dle fyzikálního experimentu pro trať s kolenem a u definování tlakové podmínky na výstupu se zadá hydraulický průměr 0,031 mm, což je výstupní průměr potrubí, tedy kolene.

Shrnutí pojmů 5

Software Ansys Fluent – slouží k modelování proudění. Je možné zde vyhodnocovat různé parametry proudění, např. tlak, rychlost, teplotu, Reynoldsovo číslo apod.

Inicializace – nastavení okrajových podmínek k dané úloze.

Reziduály – jsou mírou konvergence, představují maximum rozdílu dvou odpovídajících si veličin ve stejném bodě sítě ve dvou po sobě následujících iteracích. Snižující se hodnota reziduálu vypovídá o dobře konvergující úloze.

Otázky 5

- 1. Jaké jsou základní etapy postupu tvorby numerické simulace?
- 2. Na jaké části lze rozdělit pracovní oblast programu Ansys Fluent?
- 3. S jakými formáty souboru software Ansys Fluent pracuje?
- 4. Jaké okrajové podmínky byly zadány na vstup a výstup?



- 1. Projděte si uživatelské prostředí programu Ansys Fluent dle kap. 5.2.
- 2. Nastavte úlohy dle kap. 5.3 a proveď te výpočet pro obě geometrie.



CD-ROM

Práci v programu Ansys Fluent si může student prohlédnout v následujících animacích:

Animace_5.1_Uživatelské prostředí programu Ansys Fluent

Animace_5.2_Nastavení úlohy ve Fluentu pro geometrii A

Animace_5.3_Nastavení úlohy ve Fluentu pro geometrii B

61

6 VYHODNOCENÍ NUMERICKÉHO VÝPOČTU ZTRÁT NA VZDUCHOVÉ TRATI

V této kapitole jsou vyhodnoceny výpočty proudění vzduchu v potrubí (kap. 6.1, kap. 6.2) a následně jsou výsledky porovnány s experimentálním měřením ztrát na vzduchové trati (kap. 6.3).

6.1 Výsledky numerického výpočtu pro geometrii A



Výklad

Jakmile úloha zkonverguje a tedy můžeme předpokládat, že jsme dostali dostatečně přesné řešení (Obrázek 6.1), je možné úlohu uložit (v prostředí Workbench příkazem "*Save Project"*) a podívat se na výsledky řešení. Je vhodné si promyslet, které veličiny nás zajímají, jestli půjdou vyhodnotit přímo nebo je budeme muset dopočítat, kde pro ně musíme připravit vyhodnocovací roviny atd.



Obrázek 6.1 Reziduály značící, že je úloha zkonvergována

Pro vyhodnocení je třeba nejprve vytvořit vyhodnocovací roviny ve vhodném místě geometrie. Dvě roviny kolmé na osu potrubí (rovnoběžné se vstupem a výstupem) v místě daných odběrných míst z experimentu budou potřebné pro vyhodnocení tlakové ztráty na potrubí. Roviny vytváříme z toho důvodu, že vyhodnocení numerického výpočtu se musí co nejvíce podobat fyzikálnímu experimentu. Po vyhodnocení tlakové ztráty bude potřeba třecí ztráty dále vypočítat postupem stejným jako v kap. 2.3. Rovina v ose potrubí bude potřebná pro zobrazení kontur všech veličin po délce potrubí.

Roviny lze vytvořit pomocí příkazu *"Plane"* v roletovém menu *"Surface"*. Po zvolení příkazu se objeví okno pro vytvoření rovin, viz Obrázek 6.2. Rovina lze buď vytvořit vepsáním bodů v souřadnicích x, y a z nebo výběrem bodů v geometrii pomocí levého tlačítka myši. Poté se rovina vytvoří tlačítkem *"Create"*.

💶 Plane Surface		×
Options Aligned with Surface Aligned with View Plane Point and Normal Bounded Sample Points Plane Tool	Sample Density Edge 1 1 • Edge 2 1 • Select Points Reset Points	Surfaces inlet interior-part-one_piece_assembly_without interior-part-solid outlet wall-part-one_piece_assembly_without wall-part-one_piece_assembly_without x-coordinate-druheodberemisto x-coordinate-odbernemisto1roordinate-14 III
v0 (m) ×1 (m) 1.31935 1.31935 y0 (m) y1 (m) -0.02675 -0.0267 z0 (m) z1 (m) -0.02675 0.02675 New Surface Name plane-7	×2 (m) 5 2 (m) 75 0.02675 22 (m) 5 0.02675	Normal ix (m) 1 iy (m) 0 iz (m) 0
Creat	e Manage C	lose Help

Obrázek 6.2 Okno pro vytváření rovin

Druhá varianta, jak lze vytvořit rovinu, je přes příkaz "*Iso-Surface*" v roletovém menu "*Surface*", viz Obrázek 6.3. V okně lze vytvořit plochu dle výpočtové sítě ve zvolené souřadnici. Na Obrázek 6.3 lze vidět, jak může být vytvořena rovina v x-ové souřadnici ve vzdálenosti 0,5 m, což je první odběrné místo pro měření statického tlaku. Rovina byla pojmenována x-0.5 a je zobrazena ve výpočtové síti za clonou.

💶 Iso-Surface		
Surface of Constant Mesh	rom Surface	
X-Coordinate v Min (m) Max (m) v 0 2.6387 v iso-Values (m) 0.5 rr New Surface Name p p x-0.5 x x	uulet wali-part-one_piece_assembly_without_e wali-part-one_piece_assembly_without_e c-0.5 <u>c-coordinate-druheordheremisto</u> <u>com Zones</u> <u>art-one_piece_assembly_without_elbow</u> part-one_piece_assembly_without_elbow part-solid	
	< III >	
Create Compute Manage	Close Help	

Obrázek 6.3 Okno pro vytváření iso-rovin

Jestliže jsou všechny potřebné roviny vytvořeny, lze započít s vyhodnocováním daných veličin, jako je tlak, rychlost, Reynoldsovo číslo apod. Veškeré kontury a vektory těchto veličin se zobrazují pomocí nabídky "*Display*" v roletovém menu a následně příkazem "*Graphics and Animations*" (nebo z panelu definičních nástrojů). Zobrazí se okno s názvem "Contours", kde lze volit, jaké veličiny (např. tlak, hustota, rychlost, turbulence) na kterých plochách (inlet, outlet, přichystané roviny) chce uživatel zobrazit, viz Obrázek 6.4.

😫 Contours	×	
Options	Contours of	Contours of Velocity
V Filled	Velocity	Pressure
Node Values	Velocity Magnitude	Pressure
Global Range	Min (m/s) Max (m/s)	Velocity
Muto Range		Turbulence
Draw Drafiles	0 70.54983	Properties
Draw Profiles		Wall Huxes Cell Tefe
		Mesh
	inlet	Adaption
Levels Setun	interior-part-one_piece_assembly_withou	Residuals
	outlet	Derivatives
	wall-part-one_piece_assembly_without_e	Velocity Magnitude
	wall-nart-one niece assembly without e	Velocity Magnitude
Surface Name Pattern		X Velocity
Makak		Y Velocity
Macch	New Surface 💌	Z Velocity
	Surface Types 🔳 🗐	Axial Velocity Radial Velocity
	axis	Tangential Velocity
	clip-surf	Relative Velocity Magnitude
	exhaust-fan	Relative X Velocity
	fan 💌	Relative Y Velocity
		Relative Z Velocity
		Relative Langential Velocity Mach X-Velocity
Display	Compute Close Help	Mesh X-Velocity
		Mesh Z-Velocity
		Velocity Angle
		Relative Velocity Angle
		Vorticity Magnitude
		Helicity X-Vorticity
		Y-Vorticity
		Z-Vorticity
		Cell Reynolds Number

Obrázek 6.4 Tabulka pro zobrazení kontur jednotlivých veličin

Výsledky numerického výpočtu proudění vzduchu v potrubí při vstupní rychlosti 48,08 m \cdot s⁻¹ jsou zobrazeny v konturách na následujících Obrázek 6.5 až Obrázek 6.11.

7.04e+01	
6.69e+01	
6.34e+01	
5.99e+01	
5.64e+01	
5.28e+01	
4.93e+01	
4.58e+01	
4.23e+01	
3.87e+01	
3.52e+01	
3.17e+01	
3.17e+01 2.82e+01	
3.17e+01 2.82e+01 2.47e+01	
3.17e+01 2.82e+01 2.47e+01 2.11e+01	
3.17e+01 2.82e+01 2.47e+01 2.11e+01 1.76e+01	
3.17e+01 2.82e+01 2.47e+01 2.11e+01 1.76e+01 1.41e+01	
3.17e+01 2.82e+01 2.47e+01 2.11e+01 1.76e+01 1.41e+01 1.06e+01	
3.17e+01 2.82e+01 2.47e+01 2.11e+01 1.76e+01 1.41e+01 1.06e+01 7.04e+00	
3.17e+01 2.82e+01 2.47e+01 2.11e+01 1.76e+01 1.41e+01 1.06e+01 7.04e+00 3.52e+00	

Obrázek 6.5 *Rychlost vzduchu v potrubí* $[m \cdot s^{-1}]$



Obrázek 6.6 Detail rychlosti na cloně $[m \cdot s^{-1}]$

V konturách rychlosti na Obrázek 6.5 a Obrázek 6.6 lze vidět rychlostní pole v rovném potrubí. Rychlost vzduchu na stěně je nulová, což odpovídá no slip podmínce, kdy na stěně není uvažováno žádné smykové napětí. Směrem k ose potrubí se rychlost zvětšuje a nabývá

hodnot 49 m·s⁻¹ stejně jako u experimentálního měření. Na cloně, tedy v zúžení potrubí, se objevuje nárůst hodnoty rychlosti až na 70,4 m·s⁻¹, což plně odpovídá teorii, kdy v zúžení narůstá rychlost tekutiny a klesá statický tlak.

Rozložení statického tlaku je na následujícím Obrázek 6.7. Na vstupu do potrubí nabývá statický tlak nejvyšších hodnot, při průchodu clonou jeho hodnota prudce klesá.

3.21e+03	
2.98e+03	
2.75e+03	
2.51e+03	
2.28e+03	
2.05e+03	
1.82e+03	
1.59e+03	
1.36e+03	
1.12e+03	
8.93e+02 📕	
6.61e+02	
4.30e+02	
1.98e+02	
-3.39e+01	
-2.66e+02	
-4.97e+02	
-7.29e+02	N. I
-9.61e+02	ł.
-1.19e+03	t 💶 🖉 til state i sta
-1.42e+03	

Obrázek 6.7 Statický tlak vzduchu v potrubí [Pa]

Pokud se zaměříme na detail clony (Obrázek 6.8) a odečteme statický tlak před a za zúžením, měli bychom dostat tlakovou ztrátu na cloně. Před zúžením je statický tlak 2510 Pa, za zúžením 661 Pa, rozdíl těchto tlaků je 1849 Pa. Rozdíl statického tlaku na cloně při experimentálním měření byl 1750 Pa. Mezi hodnotou tlakové ztráty na cloně naměřené při experimentálním měření a při numerickém výpočtu činí rozdíl 5 %.

	3.21e+03	
	2.98e+03	
	2.75e+03	
	2.51e+03	
	2.28e+03	
	2.05e+03	
	1.82e+03	
	1.59e+03	
	1.36e+03	
	1.12e+03	
	8.93e+02	
	6.61e+02	
_	4.30e+02	
	1.98e+02	
	-3.39e+01	
	-2.66e+02	
	-4.97e+02	
	-7.29e+02	
	-9.61e+02	ł
	-1.19e+03	
	-1.42e+03	

Obrázek 6.8 Statický tlak na cloně [Pa]

Na Obrázek 6.9 je vyhodnocení hmotnostního průtoku vzduchu v potrubí v programu Fluent. Aby bylo možné hodnotu průtoku porovnat s hodnotou z fyzikálního experimentu, je nutné naměřený objemový průtok převést na hmotnostní průtok.

Flux Reports				
Options Mass Flow Rate Total Heat Transfer Rate Radiation Heat Transfer Rate Boundary Types axis exhaust-fan fan inlet-vent Boundary Name Pattern Save Output Parameter	Boundaries interior-part-one_piece_assembly_without_elbow interior-part-solid outlet wall-part-one_piece_assembly_without_elbow wall-part-one_piece_assembly_without_elbow-part-solid wall-part-one_piece_assembly_without_elbow-part-solid-shadow		Results 0.09709316492080689 4 III Net Results (kg/s) 0.09709316	
	Compute Write Close Help			

Obrázek 6.9 Hmotnostní průtok vzduchu v potrubí $[kg \cdot s^{1}]$

Při experimentu byla hodnota objemového průtoku vzduchu při otáčkách 80 s⁻¹ $Q_v = 0,079916 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hmotnostní průtok lze vypočítat:

 $Q_m = \rho \cdot Q_v = 1,225 \cdot 0,079916 = 0,0978971 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Hodnoty hmotnostního průtoku vypočítaného z naměřených hodnot $(0,0978971 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1})$ a hmotnostního průtoku vyhodnoceného v programu Fluent $(0,09709316 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1})$ jsou téměř shodné, hodnoty se liší pouhým necelým 1 %.

Obrázek 6.10 zobrazuje turbulentní kinetickou energii v místě za clonou. Rozložení turbulence zcela odpovídá teorii, která říká, že za zúžením vznikají vířivé oblasti z důvodu setrvačnosti kapaliny, kdy proud kapaliny nemůže sledovat tvar stěn potrubí, a proto se odtrhne.

1.54e+02	
1.47e+02	
1.39e+02	
1.32e+02	
1.24e+02	
1.16e+02	
1.09e+02	
1.01e+02	
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01	
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01 4.73e+01	
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01 4.73e+01 3.96e+01	
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01 4.73e+01 3.96e+01 3.20e+01	
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01 4.73e+01 3.96e+01 3.20e+01 2.43e+01	
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01 4.73e+01 3.96e+01 3.20e+01 2.43e+01 1.66e+01	¥
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01 4.73e+01 3.96e+01 3.20e+01 2.43e+01 1.66e+01 8.99e+00	
7.03e+01 6.26e+01 5.49e+01 4.73e+01 3.96e+01 3.20e+01 2.43e+01 1.66e+01 8.99e+00 1.33e+00	

Obrázek 6.10 *Turbulentní kinetická energie v místě za clonou* $[m^2 \cdot s^{-2}]$

6.1.1 Vyhodnocení třecích ztrát

Jak již bylo řečeno, třecí ztráty nelze ve Fluentu přímo určit konturami, musí se vypočítat na základě znalosti tlaků v odběrných místech geometrie, viz Obrázek 6.11.





Obrázek 6.11 Statický tlak v odběrných místech 1 a 2 [Pa]

Též je vhodné tlakový spád určit z průměrné hodnoty statického tlaku na obou odběrných místech pomocí plošného integrálu a určení střední hodnoty požadované veličiny na vybraných plochách. V prvním odběrném místě byl tlak 1020 Pa, v druhém 240 Pa, tlaková ztráta tedy je 810 Pa (při experimentu byl tlakový rozdíl na potrubí 743 Pa). Z tohoto údaje lze dle vzorce (1.3) vypočítat třecí součinitel λ :

$$\lambda = \frac{2 d \Delta p_t}{L v_s^2 \rho} = \frac{2 \cdot 0.046 \cdot 810}{1.7 \cdot 48.08716^2 \cdot 1.225} = 0.015474961$$

Porovnáním součinitele tření a tlakové ztráty na potrubí o měřené délce 1,7 m naměřené při fyzikálním experimentu a z numerického výpočtu vychází rozdíl hodnot mírně přes 8 %.

6.2 Výsledky numerického výpočtu pro geometrii B

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ↓ Vyhodnotit různé veličiny pro proudění vzduchu v potrubí dané geometrie.
- Pro vyhodnocení veličin si ve Fluentu připravit a vytvořit vyhodnocovací roviny.

Výklad

V úloze prodění vzduchu v potrubí geometrie B bude vyhodnocení výsledků numerického výpočtu probíhat stejným způsobem. Opět je třeba vytvořit vyhodnocovací roviny, v kterých se budou následně zobrazovat kontury různých veličin. Roviny musí souhlasit s odběrnými místy dle fyzikálního experimentu. Jedna se tedy bude nacházet ve

vzdálenosti 0,5 m od začátku vzduchové tratě, druhá přímo v ohybu kolena v x-ové vzdálenosti 2,7732 m od začátku tratě.

Výsledky numerického výpočtu proudění vzduchu v potrubí při vstupní rychlosti 12,1 m·s⁻¹ jsou zobrazeny v konturách na následujících Obrázek 6.12 až Obrázek 6.18.



Obrázek 6.12 *Rychlost vzduchu v potrubí s kolenem* $[m \cdot s^{-1}]$



Obrázek 6.13 Vektory rychlosti v koleně $[m \cdot s^{-1}]$

V konturách rychlosti na Obrázek 6.12 a Obrázek 6.13 lze vidět rychlostní pole v potrubí, které je zakončeno kolenem. Rychlost vzduchu na stěně je opět nulová, což odpovídá no slip podmínce, kdy na stěně není uvažováno žádné smykové napětí. Směrem k ose potrubí se rychlost zvětšuje a nabývá hodnot $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ stejně jako u experimentálního měření. V koleně se objevuje nárůst hodnoty rychlosti až na 30 m·s⁻¹, což plně odpovídá teorii, kdy v zúžení narůstá rychlost tekutiny a klesá statický tlak. Obrázek 6.13 zobrazuje vektory rychlosti v koleně, z nichž je patrné, jak proudící vzduch v koleně mění svoji dráhu, přesně podle teorie z Obrázek 1.2.

Rozložení statického tlaku je na následujícím Obrázek 6.14. Na vstupu do potrubí nabývá statický tlak nejvyšších hodnot, při průchodu clonou jeho hodnota klesá a nejnižší hodnota se objevuje v koleně.



Obrázek 6.14 Statický tlak vzduchu v potrubí s kolenem [Pa]

Rozložení statického tlaku na potrubí nesouhlasí s hodnotami naměřenými při fyzikálním experimentu. Tento velký rozdíl může být způsoben chybou měření, kdy hodnoty tlaků v odběrných místech na trati s kolenem velmi kolísaly a jen těžko bylo možné určit jejich hodnotu. Nepřesnost může být i na straně numerického výpočtu. Zobrazené kontury ukazují statický tlak nestlačitelného vzduchu s konstantní hodnotou hustoty i viskozity. Byly proto provedeny kontrolní výpočty se stlačitelným vzduchem, avšak s obdobnými výsledky.

Pokud se zaměříme na detail clony (Obrázek 6.15) a odečteme statický tlak před a za zúžením, měli bychom dostat tlakovou ztrátu na cloně. Před zúžením je statický tlak 930 Pa, za zúžením 823 Pa, rozdíl těchto tlaků je 107 Pa. Rozdíl statického tlaku na cloně při experimentálním měření byl 131 Pa. Rozdíl mezi hodnotou tlakové ztráty na cloně naměřené při experimentálním měření a při numerickém výpočtu je větší než u rovného potrubí.

9.31e+02 8.77e+02 8.23e+02 7.69e+02 7.15e+02 6.60e+02 6.06e+02 5.52e+02			
4.98e+02 4.44e+02 3.89e+02 3.35e+02 2.81e+02			
2.27e+02 1.73e+02 1.19e+02 6.44e+01 1.03e+01 -4.39e+01 -9.81e+01 -1.52e+02	×		

Obrázek 6.15 Statický tlak na cloně [Pa]

Na Obrázek 6.16 je vyhodnocení hmotnostního průtoku vzduchu v potrubí s kolenem v programu Fluent. Aby bylo možné hodnotu průtoku porovnat s hodnotou z fyzikálního experimentu, je opět nutné naměřený objemový průtok převést na hmotnostní průtok.

💶 Flux Reports				—
Options Mass Flow Rate Total Heat Transfer Rate Radiation Heat Transfer Rate		Boundaries inlet interior-part-solic outlet wall-part-solid		Results 0.0242423489689827
Boundary Types axis exhaust-fan fan inlet-vent	 • • • • • 			
Boundary Name Pattern Match Save Output Parameter				✓ III ► Net Results (kg/s) 0.02424235
Compute	Write	. Close	Hel	q

Obrázek 6.16 *Průtok vzduchu v potrubí s kolenem* $[kg \cdot s^{1}]$
Při experimentu byla hodnota objemového průtoku vzduchu při otáčkách 80 s⁻¹ $Q_v = 0,020119 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hmotnostní průtok lze vypočítat:

$$Q_m = \rho \cdot Q_v = 1,225 \cdot 0,020119 = 0,024646 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hodnoty hmotnostního průtoku vypočítaného z naměřených hodnot (0,024646 kg·s⁻¹) a hmotnostního průtoku vyhodnoceného v programu Fluent (viz Obrázek 6.16) jsou téměř shodné, hodnoty se liší o necelá 2 %.

Obrázek 6.17 a Obrázek 6.18 zobrazuje turbulentní kinetickou energii v místě clony a v koleně. Rozložení turbulence zcela odpovídá teorii, která říká, že za zúžením vznikají vířivé oblasti z důvodu setrvačnosti kapaliny, kdy proud kapaliny nemůže sledovat tvar stěn potrubí, a proto se odtrhne.



Obrázek 6.17 Turbulentní kinetická energie v místě za clonou $[m^2 \cdot s^{-2}]$

Při vstupu do kolene – tedy do zúžení, se objevuje nejvyšší hodnota turbulence. Při zúžení potrubí dochází k odtržení proudu vzduchu a toto odtržení je doprovázeno vznikem vírů u stěny potrubí a dochází zde k nárůstu kinetické energie.

1.16e+01 1.10e+01 1.05e+01 9.89e+00 9.31e+00 8.74e+00 8.17e+00 7.60e+00 7.03e+00 6.46e+00 5.88e+00 5.31e+00 4.74e+00	
4.17e+00 3.80e+00 3.03e+00	
2.45e+00 1.88e+00 1.31e+00 7.39e-01 1.67e-01	×

Obrázek 6.18 *Turbulentní kinetická energie v koleně* $[m^2 \cdot s^{-2}]$

6.3 Celkové shrnutí výsledků fyzikálního a numerického experimentu na obou geometriích



Výklad

V této studijní opoře bylo předvedeno propojení fyzikálního experimentu s numerickými výpočty v softwaru Ansys Fluent. Nejprve byly v kap. 1 vysvětleny základní pojmy potřebné pro provedení experimentů – ztráty, jejich rozdělení, příčiny vzniku apod.

Fyzikální experiment (viz kap. 2) pro naměření třecí ztráty na vzduchové trati probíhal na dvou různých geometriích vzduchové tratě. Trať A skládala z ventilátoru, na který byl připojen přímý úsek plastového potrubí o délce 0,335 m a průměru 46 mm. Za tímto úsekem byla umístěna clona jako průřezové měřidlo k určení velikosti průtoku vzduchu. Dále následoval přímý úsek potrubí o délce 2,26 m. Odběrná místa se nacházela v 0,5 m a v 2,2 m od začátku tratě. Měření tlakové ztráty tedy proběhlo na měřené délce 1,7 m. Trať byla za druhým odběrným místem ukončena krátkým rovným úsekem potrubí. U trati B bylo za rovný úsek potrubí o délce 2,26 m připojeno koleno s poloměrem r = 70 mm, úhlem 90° a vnitřním průměrem zahnutého potrubí 31 mm s odběrným místem přímo v ohybu kolene. Odběrná místa na této trati se nacházela v 0,5 m a v 2,7732 m od začátku tratě. Měření

tlakové ztráty tedy proběhlo na měřené délce 2,2732 m. Výsledky měření včetně potřebných výpočtů jsou uvedeny v kap. 2.3.

Pro numerický experiment – výpočet ve Fluentu, byly vytvořeny 3D geometrie v softwaru Inventor, které odpovídaly geometrii vzduchových tratí použitých při fyzikálním experimentu. Stručný popis programu Inventor a postup vytvoření obou geometrií je uveden v kap. 3. Tyto geometrie byly následně vysíťovány v programu Ansys Meshing. Stručný popis uživatelského prostředí programu Ansys Meshing spolu s postupem vytvoření výpočtové sítě na geometriích je uveden v kap. 4.

Vysíťované geometrie byly importovány do programu Ansys Fluent, kde byly definovány všechny parametry potřebné pro výpočet. Uživatelské prostředí programu Ansys Fluent a nastavení úloh je uvedeno v kap. 5. Vyhodnocení výsledků z numerických výpočtů a porovnání těchto výsledků s výsledky z fyzikálního experimentu je uvedeno v této kap. 6.

U geometrie A byly s fyzikálním experimentem srovnávány hodnoty rychlosti, statického tlaku, průtoku a tlakové ztráty na cloně i na potrubí. Porovnané hodnoty rychlostí a průtoků z obou experimentů se shodovaly. U statického tlaku se hodnoty lišily v řádu 8 % u tlakové ztráty na potrubí a 5 % na tlakové ztrátě na cloně.

U geometrie B byly s fyzikálním experimentem srovnávány tytéž hodnoty rychlosti, statického tlaku, průtoku a tlakové ztráty. Porovnané hodnoty rychlostí a průtoků z obou experimentů se opět shodovaly. Porovnané hodnoty rozdílu statického tlaku na cloně se velmi liší a tlaková ztráta na potrubí je zcela mimo rozsah. Je možné, že nepřesnosti vznikly chybou měření, kdy při měření hodnoty statického tlaku v odběrných místech velmi kolísaly a jen velmi těžko bylo možné odečíst určitou ustálenou hodnotu tlaku.

Shrnutí pojmů 6

Příkaz "Plane" – příkazem lze vytvořit roviny potřebné pro vyhodnocování různých veličin.

Příkaz "Graphics and Animations" – v této nabídce lze zobrazovat kontury různých veličin jako je tlak, rychlost, turbulence apod. na vybraných rovinách.



Otázky 6

- 1. Jak vytvoříme rovinu potřebnou pro vyhodnocení veličin?
- 2. Které veličiny lze na vzduchové trati vyhodnotit?



Úlohy k řešení 6

1. Vyhodnoť te výsledky numerického výpočtu obou úloh a porovnejte je s hodnotami získanými z experimentálního měření.



Práci s výsledky numerického výpočtu v programu Ansys Fluent si může student prohlédnout v následujících animacích:

Animace_6.1_Vyhodnocení výsledků ve Fluentu pro geometrii A

Animace_6.2_Vyhodnocení výsledků ve Fluentu pro geometrii B



Další zdroje

Seznam další literatury, www odkazů apod., pro zájemce o dobrovolné rozšíření znalostí popisované problematiky.

- [1] DRÁBKOVÁ, S. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 2007. 257 s. [online].
 ISBN 978-80-248-1508-4. Dostupné z <u>http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf</u>.
- [2] JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B., ADAMEC, J. *Mechanika tekutin*. Dotisk 3. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 150 s.
- [3] DRÁBKOVÁ, S. KOZUBKOVÁ, M. *Cvičení z mechaniky tekutin*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 2002. 141 s. [online].
 Dostupné z <u>http://www.338.vsb.cz/PDF/HydroPriklad.pdf</u>.
- [4] NOSKIEVIČ, J. *Hydromechanika*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská Ostrava, 1986.
 130 s.
- [5] KOZUBKOVÁ, M. a kol. Mechanika tekutin: návody pro laboratorní měření. Ostrava: VŠB-TUO, 2007. 113 s.
- [6] BOJKO, M. 3D proudění ANSYS Fluent. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 2010. 226 s.
 [online]. Dostupné z http://www.338.vsb.cz/PDF/3D-Proudeni-ANSYS-Fluent.pdf.
- [7] ANSYS FLUENT INC. Fluent 13.0, Help User's guide. Fluent Inc. 2010.
- [8] ANSYS FLUENT INC. Fluent 13.0, Help Theory guide. Fluent Inc. 2010.
- [9] BUDAI, D. Autodesk: Příběh společnosti, která dala světu AutoCAD. *ITBIZ* [online].
 2010 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z <u>http://www.itbiz.cz/autodesk-pribeh-spolecnosti-ktera-dala-svetu-autocad</u>.
- [10] KOZUBKOVÁ, M. Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. Ostrava: VŠB-TUO,
 2008. 153 s. [online]. Datum poslední revize 12. 12. 2008. Dostupné z <u>http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf</u>.
- [11] BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002. 914 p. ISBN 0-471-41077-2.
- [12] POZRIKIDIS, C. Fluid Dynamics: Theory, Computation, and Numerical Simulation.
 2nd Edition. USA: Springer, 2009. 773 p. ISBN 978-0-387-95869-9.

[13] SHAUGHNESSY, E. J., KATZ, I. M., SCHAFFER, J. P. Introduction to Fluid Mechanics. New York: Oxford University Press, 2005. 1056 p. ISBN-13: 978-0-19-515451-1.



Klíč k řešení

0 1.1, 15

Jiným slovem ztráty, které jsou způsobeny překonáváním hydraulických odporů. Vznikají při proudění skutečných kapalin.

0 1.2, 15

Ztráty dělíme na třecí a místní. Třecí ztráty převažují u dlouhých potrubí, jejich příčinou jsou třecí síly a jsou úměrné délce potrubí. Místní ztráty vznikají v místech, kde se mění velikost rychlosti (změna průřezu potrubí), směr rychlosti (zakřivené potrubí, ohyby) nebo velikost i směr rychlosti. Jsou způsobeny vířením tekutiny.

O 2.1, 28

Vzduchová trať se skládá se z ventilátoru, který je poháněn elektromotorem. Ten je ovládán frekvenčním měničem, pomocí něhož lze měnit otáčky a tím i průtok. Za výstupem z ventilátoru následuje přímý úsek plastového potrubí, za nímž je umístěna clona jako průřezové měřidlo k určení velikosti průtoku vzduchu. Dále navazuje potrubí dle typu vzduchové tratě.

O 2.2, 28

Nejdříve je potřeba připojit pomocí hadiček snímač tlakové diference na odběrná místa, tj. před a za měřený prvek a clonu. Tento snímač tlakové diference se zapojí do vyhodnocovacího zařízení. Ostatní odběry tlaku musí být zatěsněné. Pustí se ventilátor a pomocí frekvenčního měniče se nastaví na maximální otáčky. Při maximálních otáčkách se odečtou hodnoty tlakové diference na cloně Δp_c a na měřeném úseku potrubí Δp_t . Měření pokračuje postupným snižováním frekvence na frekvenčním měniči, čímž se snižují otáčky ventilátoru a tím zároveň průtok vzduchu. Pro každou hodnotu průtoku se odečtou hodnoty tlakové diference na průřezovém měřidle, tj. na cloně Δp_c , a na naměřeném úseku potrubí Δp_t .

O 2.3, 28

Naměříme tlakovou diferenci neboli rozdíl tlaků měřených ve dvou odběrných místech.

O 2.4, 29

Clona je průřezové měřidlo, pomocí kterého lze zjistit průtok potrubím.

O 2.5, 29

Pomocí cejchovní křivky clony lze z tlakového spádu na cloně určit velikost průtoku tekutiny v potrubí.

0 3.1, 34

Geometrie se kreslí jako tzv. Sketch (náčrtek). Ve zvolené rovině uživatel kreslí čáry, kružnice, obdélníky, oblouky, definuje si je kótami, zaobluje nebo sráží hrany atd. Náčrt se poté ukončí a vytvoří se model. Konečného modelu lze dosáhnout různými funkcemi, jako je např. vysunutí náčrtu, rotace náčrtu kolem zvolené osy apod.

O 3.2, 34

Vytažení geometrie náčrtu do prostoru, zaoblení rohů, orotování tělesa, srážení hran.

0 4.1, 42

Automatic, Tetrahedrons, Hexdominant, Sweep, Multizone.

O 4.2, 42

Hodnota by neměla přesáhnout 0,8.

O 4.3, 42

Je to metoda síťování, kterou je vhodné použít, je-li možné síťovat všechny oblasti čistě hexahedral prvky.

O 5.1, 60

Základní schéma obecného postupu tvorby numerické simulace: *preprocess*, neboli příprava úlohy pro numerický výpočet, tj. připravení výpočetní sítě, definování matematického modelu (např. jednofázový model, model turbulence, vícefázový model atd.), fyzikálních vlastností jednotlivých proudících médií, nastavení okrajových a počátečních podmínek. Dále nastavení vlastností řešiče, inicializace řešení. *Process* – samotný výpočet a *postprocess* – vyhodnocení výsledků numerické simulace.

O 5.2, 60

Uživatelské prostředí programu Ansys Fluent lze rozdělit do pěti částí: roletové menu, panel nástrojů (ikon), grafické okno (pracovní plocha), definiční nástroje a popisové a příkazové okno (konzole).

O 5.3, 60

Ansys Fluent pracuje se dvěma typy souboru – ***.cas** a ***.dat**. Soubor formátu *.cas obsahuje nastavení matematického modelu, soubor formátu *.dat obsahuje výsledky numerické simulace.

O 5.4, 60

Vstup – rychlostní okrajová podmínka velocity-inlet, výstup – tlaková okrajová podmínka pressure-outlet.

0 6.1, 75

Vyhodnocovací rovinu vytvoříme pomocí příkazu *"Plane"*, a to buď vepsáním bodů v souřadnicích x, y a z nebo výběrem bodů v geometrii pomocí levého tlačítka myši. Poté se rovina vytvoří tlačítkem *"Create"*.

O 6.2, 75

Lze vyhodnotit tlaky, rychlosti, Reynoldsovo číslo, míru turbulence. Třecí ztráty se musí dopočítat z tlakové ztráty.

Úlohy

Všechny úlohy jsou koncipovány tak, aby si student zopakoval a sám v softwaru prošel právě probranou kapitolu.