

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Modelování místních tlakových ztrát v prostředí CFD FLUENT, verifikace modelu

Autor: **Josef MIŠTERA**
Vedoucí práce: **Ing. Roman Gášpár**
Odborný konzultant: **Ing. Michal DOSTÁL**

Akademický rok 2015/2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef MIŠTERA**
Osobní číslo: **S13B0216P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Název tématu: **Modelování místních tlakových ztrát v prostředí
CFD FLUENT, verifikace modelu**
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Máte za úkol:

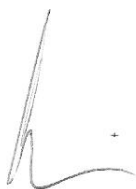
1. Teoreticky popsat modelování místních tlakových ztrát v kanále protékaném kapalným médiem. Teoreticky popsat modelování porezních materiálů a příslušných tlakových ztrát.
2. Popsat modelování porezních materiálů a příslušných tlakových ztrát v CFD systému Fluent, definice možných přístupů.
3. V prostředí CFD systému Fluent na jednoduché geometrii porovnat vypočtené tlakové ztráty s analytickým řešením.

Rozsah grafických prací: schémata, výkresy
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- Mott R. L.: Applied Fluid Mechanics, Third Edition, Merrill Publishing Company, 1990
- Idelčik I. Je.: Spravočnik po gidravličeskim soprotivlenijam, Mašinostrojenije, Moskva, 1975
- Anderson J. D.: Computational fluid dynamics: <<The>> basics with applications, New York: McGraw-Hill, 1995. 547 s., ISBN 0-07-001685-2

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Roman Gášpár
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant bakalářské práce: Ing. Michal Dostál
Škoda JS a.s., Plzeň

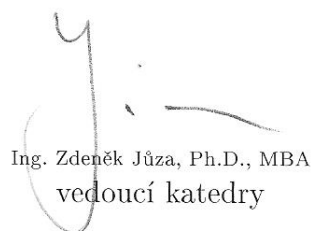
Datum zadání bakalářské práce: 2. listopadu 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 20. května 2016



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Jůza, Ph.D., MBA
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval za vedení práce a připomínky panu Ing. Romanu Gášpárovi. Také bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Dostálovi z firmy Škoda JS a.s. za jeho náměty a ochotu při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat firmě Škoda JS a.s. za velice zajímavé téma bakalářské práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Mištera	Jméno Josef		
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Gášpár	Jméno Roman		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Modelování místních tlakových ztrát v prostředí CFD FLUENT, verifikace modelu			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	52	TEXTOVÁ ČÁST	43	GRAFICKÁ ČÁST	9
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce se zabývá tlakovými ztrátami v potrubí. Zaměřuje se na jejich teoretický popis a analytický výpočet. Dále bylo podrobněji zpracováno modelování tlakových ztrát vyvolané vloženým porézním médiem v softwaru Ansys Fluent. Na závěr práce byly provedeny praktické úlohy tlakových ztrát analyticky a numericky.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>CFD, Ansys, Fluent , tlakové ztráty, numerická simulace</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Mištera	Name Josef	
FIELD OF STUDY	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Gášpár	Name Roman	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Modeling local pressure dropp in environment FLUENT CFD, model verification		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2016
----------------	---------------------------	-------------------	--------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	52	TEXT PART	43	GRAPHICAL PART	9
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This thesis deals with pressure losses in the pipeline. It focuses on the theoretical description and analytical calculation. It was further elaborated in detail modeling of pressure loss due embedded in porous media software Ansys Fluent. At the conclusion of the work were carried out practical tasks pressure losses analytically and numerically.</p>
KEY WORDS	CFD, Ansys, Fluent, pressure drop, numerical simulation

Obsah

Seznam použitých veličin.....	10
Úvod.....	12
1 Matematický model proudění tekutin	14
1.1 Základní rovnice mechaniky tekutin	14
1.1.1 Rovnice kontinuity	14
1.1.2 Pohybová rovnice (druhý Newtonův zákon).....	14
1.1.3 Energetická rovnice.....	15
1.1.4 Další rovnice používané v popisu proudění tekutin	15
1.2 Tlakové ztráty v potrubí	16
1.2.1 Energetická rovnice pro potrubí s uvážením tlakových ztrát.....	16
1.3 Analytický výpočet tlakové ztráty	16
1.3.1 Ztráty třením.....	17
1.3.2 Místní tlakové ztráty vyvolané změnou průřezu	18
1.3.3 Místní tlakové ztráty porézních médií.....	19
2 CFD modelování	22
2.1 Matematické modelování a numerické metody.....	22
2.1.1 Verifikace a validace	22
2.1.2 Úvod do CFD výpočtů	23
2.2 Metody řešení	23
2.2.1 Metoda konečných objemů (MKO)	23
2.3 Postup řešení.....	24
2.4 Geometrie	24
2.5 Výpočetní síť	24
2.5.1 Základní typy výpočetních sítí	25
2.5.2 Kvalita výpočetní sítě.....	25
3 Modelování porézních médií v ANSYS Fluent	27
3.1 Porous jump.....	27
3.2 Omezení a předpoklady modelu porézních materiálů	27
3.2.1 Povrchová a fyzická rychlost „superficial, physical velocity“	27
3.3 Rovnice hybnosti porézního média	28
3.3.1 Darcyho zákon v porézních médiích.....	29
3.3.2 Inerciální Ztráty v porézních	29
3.4 Úprava energetické rovnice v porézních médiích	30

3.4.1	Model rovnice tepelné rovnováhy	30
3.4.2	Model rovnice tepelné nerovnováhy	31
3.5	Turbulence v porézních médiích	31
3.6	Vliv pórovitosti na skalární rovnice	32
3.7	Uživatelské vstupy pro porézní média [3]	32
3.7.1	Definice porézní zóny	32
3.7.2	Definice formulace porézní rychlosti (volitelný)	32
3.7.3	Identifikace kapaliny protékající porézním médiem	33
3.7.4	Aktivace reakcí v porézní zóně	33
3.7.5	Zahrnutí relativní odporové rychlosti do formulace odporu	33
3.7.6	Nastavení viskózního a inerciálního odporu	33
3.7.7	Definice poréznosti	34
3.7.8	Definice nastavení přestupu tepla.....	34
3.7.9	Povolení zdrojových členů	35
3.7.10	Definice veškerých fixních hodnot (volitelné).....	35
3.7.11	Nastavení potlačení turbulentní viskozity v porézní oblasti	35
3.7.12	Nastavení osy otáčení a zóny pohybu	35
3.8	Modelování porézních médií s použitím formulace fyzické rychlosti	35
3.9	Strategie řešení pro porézní média	36
4	Řešení úlohy porézního média	37
4.1	Definice úlohy	37
4.2	Teoretický výpočet	37
4.3	Numerický výpočet.....	38
4.4	Srovnání výsledků analytického a numerického řešení.....	44
5	Řešení úlohy tlakové ztráty vyvolané změnou průřezu	45
5.1	Definice úlohy	45
5.2	Teoretický výpočet	46
5.3	Numerický výpočet.....	48
	Použité nastavení a výsledky.....	51
5.4	Srovnání výsledků analytického a numerického řešení.....	55
	Závěr.....	56
	Seznam použitých zdrojů	57
	Seznam obrázků	58
	Seznam tabulek	59

Seznam použitých veličin

Název veličiny	Značka veličiny	Jednotka veličiny
Hustota	ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$
Složka rychlosti	w	$[m \cdot s^{-1}]$
Vektor rychlosti	\mathbf{w}	$[m \cdot s^{-1}]$
Čas	t	$[s]$
Souřadnice	x, y, z	$[-]$
Složka síly	F	$[N]$
Vektor síly	\mathbf{F}	$[N]$
Hmotnost	m	$[kg]$
Vnější setrvačné zrychlení	R	$[m \cdot s^{-2}]$
Tlak	p	$[Pa]$
Sčítací indexy	i, k	$[-]$
Kinematická viskozita	ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
Měrná entalpie	h	$[J \cdot kg^{-1}]$
Smykové napětí	τ	$[Pa]$
Měrné teplo	q	$[J \cdot kg^{-1}]$
Ztrátový součinitel	ξ	$[-]$
Gravitační zrychlení	g	$[m \cdot s^{-2}]$
Měrná energie	e	$[J \cdot kg^{-1}]$
Součinitel třecích ztrát	λ	$[-]$
Délka potrubí	l	$[m]$
Průměr potrubí	d	$[m]$
Ekvivalentní drsnost	k	$[m]$
Poloměr zaoblení	r	$[m]$
Délka strany čtvercového průřezu	a	$[m]$

Obsah plochy	S	$[m^2]$
Délka porézního média	L	$[m]$
Koeficient propustnosti	k	$[m \cdot s^{-1}]$
Tlakový gradient	$h_a - h_b$	$[m]$
Koeficient viskózního odporu	$C_{viscous}$	$[m^{-2}]$
Koeficient inerciálního odporu	$C_{inercial}$	$[m^{-1}]$
Dynamic viscosity	μ	$[kg \cdot s^{-1}]$
Objem	V	$[m^3]$
Složka zdrojového členu hybnosti	S_i	$[kg \cdot m \cdot s^{-1}]$
Matice definující inerciální ztráty porézního média	\mathbf{C}	$[m^{-2}]$
Složka definující inerciální ztráty porézního média	C_{ij}	$[m^{-2}]$
Matice definující viskózní ztráty porézního média	\mathbf{D}	$[m^{-1}]$
Složka definující viskózní ztráty porézního média	D_{ij}	$[m^{-1}]$
Propustnost	α	$[m]$
Propustnost ve směru	α	$[m]$
Délka porézního média ve směru	Δn_i	$[m]$
Celková energie	E	$[J]$
Tepelná vodivost	k_{eff}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Tenzor smykových napětí	$\bar{\tau}$	$[Pa]$
entalpie média	S_h	$[J]$
Porosita	γ	$[-]$
Efektivní porosita	ϕ	$[-]$
Hmotnostní tok	\dot{m}	$[kg \cdot s^{-1}]$

Úvod

Řešení praktických problémů mechaniky tekutin vyžaduje studium fyzikálních jevů. Tyto jevy se již podařilo popsat matematickými rovnicemi. Nicméně tento popis je kombinace několika parciálních diferenciálních rovnic, pro které není známo obecné řešení. V praxi je ale potřeba nějakým způsobem dosáhnout výsledků, existují v zásadě tři možnosti. První, jsou analytické metody řešení. Ty mají značné omezení z hlediska složitosti, jsou omezeny řešitelností matematických úloh. Druhou možností řešení jsou numerické simulace. Ty jsou využívány stále častěji především důsledkem rozvoje výpočetní techniky a snižováním cenové náročnosti programů. Třetí možností je vytvoření experimentálního zařízení a přímé měření.

Jak bylo zmíněno, analytické metody v pravém slova smyslu jsou využitelné pouze ve speciálních případech, a tedy nenacházejí významné uplatnění v praktických problémech. V praxi je tedy možno využít numerické simulace, nebo experiment. Numerické simulace jsou často i několikanásobně cenově a časově úspornější, než získávání experimentálních výsledků. Přesto je nutné se experimenty zabývat a ověřovat jimi platnost teoretických předpokladů a výsledků.

Cílem práce bylo ověření dosahovaných výsledků v úlohách místních tlakových ztrát. Řešení práce bylo prováděno ve spolupráci s firmou Škoda JS a.s., kde budou závěry práce sloužit jako obhájení standardně využívaných postupů řešení.

Cíl byl dosažen postupným modelováním místních tlakových ztrát v prostředí CFD FLUENT a verifikace modelů. Úlohy místních tlakových ztrát jsou nezbytné pro dimenzování potrubních tratí. Dimenzováním se rozumí návrh rozměrů případně tlakových poměrů v tratích. Výchozím předpokladem je, že celková tlaková ztráta potrubí musí být maximálně rovna dispozičnímu tlaku, což je tlak vnějšího zdroje z pravidla čerpadla. Verifikace modelu byla provedena porovnáním analytického a numerického řešení. Úplné analytické řešení není možné v zadaných úlohách získat. Jako analytické je zde považováno tedy řešení, které je zobecněním experimentů a je pro svou průkaznost všeobecně přijímáno. Řešení je založeno na polo empirických metodách, grafech a výpočtových vzorcích. Toto řešení bylo provedeno podle literatury [1], která je považována za nejobsáhlejší.

Bakalářská práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část práce byla rozdělena do 3 kapitol. V první kapitole práce byly uvedeny základní rovnice mechaniky tekutin, na kterých je založeno CFD modelování. Byla popsána teorie tlakových ztrát, jejich rozdělení a základní výpočtové vztahy s důrazem na úlohy v praktické části práce. Ve druhé kapitole byla popsána základní teorie numerických simulací a úvod do CFD systémů. Byl popsán základní postup modelování a bylo definováno kvalitativní hodnocení výpočetních sítí. Třetí kapitola byla věnována popisu modelování porézních materiálů v CFD FLUENT. Předlohou pro tuto část byla literatura [2] [3], vydaná přímo výrobcem softwaru, firmou ANSYS, Inc.

Praktická část práce spočívala v řešení dvou úloh tlakových ztrát. Úlohy byly navrženy zadavateli práce. První úloha byla přímá trubice s vloženým porézním médiem, druhá byla

přímá trubice se zúžením. Byl proveden analytický a numerický výpočet tlakových ztrát. Numerický výpočet byl proveden v systému CFD ANSYS FLUENT. V závěru práce byly porovnány dosažené výsledky analytické a numerické metody výpočtu. Byly srovnány oba přístupy ve své náročnosti a použitelnosti.

1 Matematický model proudění tekutin

1.1 Základní rovnice mechaniky tekutin

Prostorové proudění je popsáno třemi základními rovnicemi proudění. Ty vycházejí z fyzikální principy. Pro práci zabývající se prouděním tekutin je tedy nutné uvést tyto základní rovnice.

1.1.1 Rovnice kontinuity

Rovnice je vyjádřením zákona zachování hmoty v proudové trubici. Hmotnost, která vtéká do elementárního hranolu, se rovná úbytku hmotnosti v objemu způsobeném časovou změnou. Rovnice (1.1) je odvozena v literatuře [4]

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.1)$$

1.1.2 Pohybová rovnice (druhý Newtonův zákon)

Pohybová rovnice pro tří-rozměrové vazké proudění je nejdůležitější z parciálních diferenciálních rovnic proudění. [4]

Tato rovnice vychází z druhého Newtonova zákona (1.2)

$$m \cdot \frac{d\vec{w}}{dt} = \sum_1^N \vec{F}_i \quad (1.2)$$

Kde F_i je souhrn sil [N]; m je hmotnost tekutiny [kg];

Úpravami byl odvozen konečný tvar pohybové rovnice, známý jako Navierovy - Stokesovy rovnice (1.3). Odvození rovnice je možné nalézt v literatuře [4].

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_k \frac{\partial w_k}{\partial t} = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left(\frac{\partial w_k}{\partial k} \right) \quad (1.3)$$

Kde $\frac{\partial w_i}{\partial t}$ je místní zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]; $w_k \cdot \frac{\partial w_k}{\partial t}$ je vnitřní setrvačné zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]; R_i je vnější setrvačné zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]; $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i}$ je zrychlení od tlakových sil [$m \cdot s^{-2}$]; $\nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2}$ je zrychlení od třecích sil bez ohledu na stlačitelnost proudění [$m \cdot s^{-2}$]; a $\frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left(\frac{\partial w_k}{\partial k} \right)$ je zrychlení od třecích sil s ohledem na stlačitelnost proudění [$m \cdot s^{-2}$] [4]

Zvláštním případem Navierovy - Stokesovy rovnice je Eulerova rovnice (1.5), která uplatňuje předpoklad neviskózního média dle rovnice (1.4).

$$v = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_k \frac{\partial w_k}{\partial t} = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} \quad (1.5)$$

Dalším speciálním případem Navierovy - Stokesovy rovnice je obecná Bernoulliova rovnice (1.6).

$$w dw = R_k dk - \frac{1}{\rho} \left(dp - \frac{\partial p}{\partial t} dt \right) \quad (1.6)$$

1.1.3 Energetická rovnice

Energetická rovnice vychází ze zákona zachování energie. Rovnice je opět odvozena v literatuře [4] a má tvar (1.7).

$$\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = \frac{\tau_{kl}}{\rho} \frac{\partial w_k}{\partial l} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_k}{\partial k} + \frac{q_v}{\rho} \quad (1.7)$$

Kde $\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt}$ je měrná změna energie za čas; $\frac{\tau_{kl}}{\rho} \frac{\partial w_k}{\partial l}$ je disipace kinetické energie; $\frac{1}{\rho} \frac{\partial q_k}{\partial k}$ je difúze tepla do okolí; $\frac{q_v}{\rho}$ je produkce tepla

1.1.4 Další rovnice používané v popisu proudění tekutin

- rovnice pro turbulentní veličiny
- rovnice chemických reakcí
- rovnice pro vícefázové proudění
- stavová rovnice plynu

Reynoldsovo číslo

Na základě tohoto experimentu bylo odvozeno Reynoldsovo číslo. Je to poměr setrvačných a vazkých sil. Vlastní odvození rovnice (1.8) je uvedeno v literatuře [5].

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad (1.8)$$

Kde w je střední rychlost v profilu [$m \cdot s^{-1}$]; l je charakteristický rozměr [m]; ν je součinitel dynamické vazkosti [$m^2 \cdot s^{-1}$]

1.2 Tlakové ztráty v potrubí

Při proudění skutečných tekutin vznikají, příčinou nenulové hodnoty viskozity a tření částic hydraulické odpory. Hydraulické odpory jsou síly působící na částice tekutiny proti směru pohybu. Práce těchto třecích sil způsobuje snížení mechanické energie. Rozptýlená energie se mění v teplo a projevuje se jako zvýšení vnitřní energie proudící tekutiny, což je nevratná změna.

Při proudění skutečných tekutin v potrubí tedy dochází vždy k energetickým ztrátám. Ztráty se projevují snížením vstupního tlaku na výstupní. Tlakové ztráty se obecně rozdělují na ztráty třením a ztráty místní. Toto rozdělení je dáno vznikem hydraulického odporu. Rozdílností rychlostí částic a stěn, vznikají ztráty třecí. Při rozdílných rychlostech částic mezi sebou vznikají místní ztráty. Matematicky to lze vyjádřit vztahem (1.9), kde součinitel ξ může reflektovat ztráty třecí, nebo místní.

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (1.9)$$

Celková tlaková ztráta úseku potrubí je rovna součtu ztrát třením a ztrát způsobených jednotlivými místními odpory. Je ji možno vyjádřit vztahem (1.10).

$$\Delta p_z = \Delta p_T + \Delta p_M \quad (1.10)$$

Kde Δp_T [Pa] je celková třecí tlaková ztráta Δp_M [Pa] je celková místní tlaková ztráta

1.2.1 Energetická rovnice pro potrubí s uvažováním tlakových ztrát

Energetická rovnice s uvažováním ztrátové energie má tvar (1.11). Měrná ztrátová energie je ztrátová energie e_z vztažená na jednotku hmotnosti, lze ji vyjádřit podle rovnice (1.12).

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} + gh_2 + e_z \quad (1.11)$$

$$e_z = \frac{\Delta p_z}{\rho} \quad (1.12)$$

Kde p_1 [Pa] je vstupní tlak; p_2 [Pa] je výstupní tlak; ρ [kg.m⁻³] je hustota tekutiny; w_1 [m.s⁻¹] je vstupní rychlost; w_2 [m.s⁻¹] je výstupní rychlost; g [m.s⁻²] je gravitační zrychlení; h_1 [m] je výška vstupu; h_2 [m] je výška výstupu; e_z [J.kg⁻¹] je měrná ztrátová energie

1.3 Analytický výpočet tlakové ztráty

Jak bylo popsáno, je celková tlaková ztráta rovna součtu ztrát třením a ztrát místních. Pro výpočet jednotlivých tlakových ztrát jsou známy analytické výpočtové vztahy. Tyto vztahy

vychází z empiricky zjištěných koeficientů, pro některé případy jsou přímo odvozené. Dále jsou uvedeny výpočtové vzorce pro základní výpočty tlakových ztrát použité v praktické části práce.

1.3.1 Ztráty třením

Ztráty třením vznikají na celé délce potrubí a vzrůstají ve směru proudění tekutiny. Tlaková ztráta v kruhovém potrubí stálého průměru se určí podle Weisbachova vztahu (1.13).

$$\Delta p_T = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (1.13)$$

Kde Δp_T [Pa] je ztráta třením; λ [-] je součinitel třecích ztrát; l [m] je délka potrubí; d [m] je průměr potrubí; ρ [kg.m⁻³] je hustota tekutiny; w [m.s⁻¹] je střední průtoková rychlost.

Součinitel tření λ v trubce s laminárně proudící tekutinou a vyvinutým prouděním je funkcí pouze Reynoldsova čísla. V logaritmickém diagramu na obr. 1 je závislost (1.14) zobrazena sestupnou přímkou L. [4]

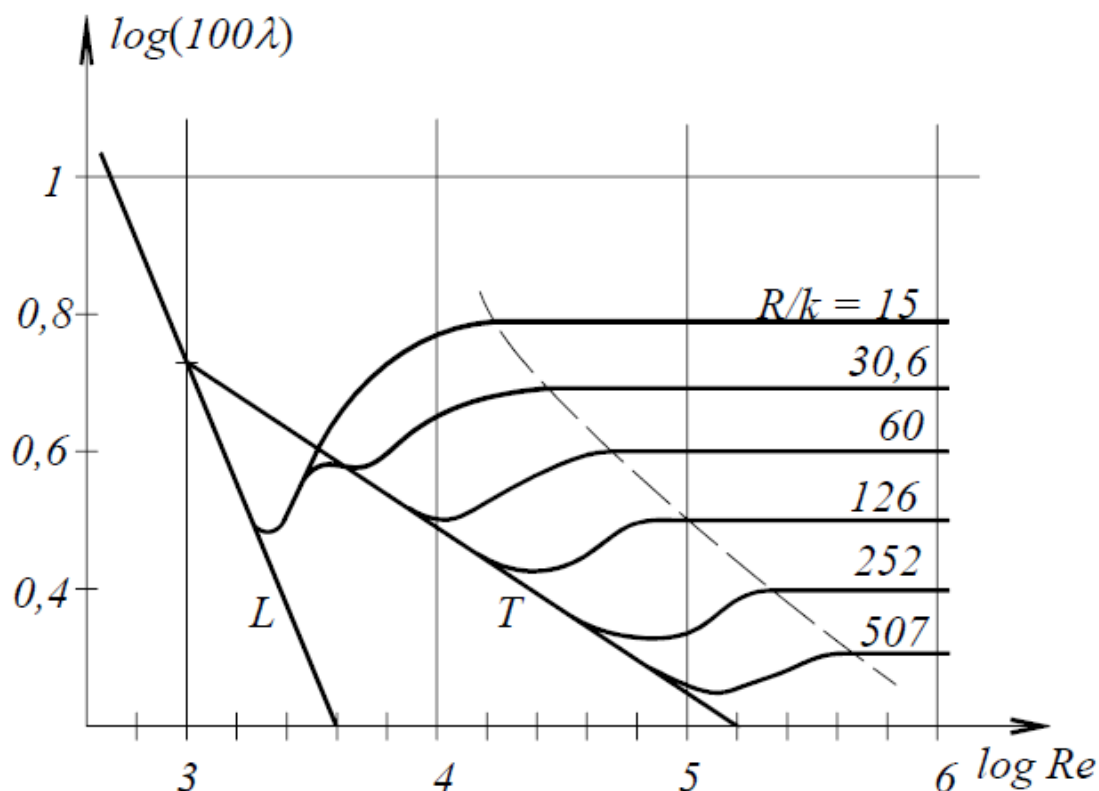
$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1.14)$$

Kde Re [-] je Reynoldsovo číslo

Součinitel tření λ v trubce s turbulentně proudící tekutinou pro případ hydraulicky hladkého potrubí je funkcí pouze Reynoldsova čísla. Na základě experimentů byla odvozena závislost (1.15), která byla na obr. 1 zobrazena přímkou T.

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (1.15)$$

Při turbulentním proudění hydraulicky drsným potrubím závisí součinitel tření λ na stupni zdrsňení R/k a na Reynoldsově čísle. Kde k [m] je ekvivalentní drsnost potrubí. Na obr. 1 jsou znázorněny křivky charakterizované svým stupněm zdrsňení. Velikost λ na Reynoldsově čísle nezávisí u silně turbulentního proudění. Mez této závislosti je znázorněna čárkovanou čarou v diagramu na obr. 1.



Obrázek 1 - Závislost velikosti součinitele třecích ztrát na velikosti Reynoldsova čísla [4]

1.3.2 Místní tlakové ztráty vyvolané změnou průřezu

Místní ztráty jsou vytvořeny vloženými odpory nebo tvarovými různorodostmi. Dochází k intenzivnímu víření a změně velikosti rychlosti, zejména jejím náhlým snížením. Tlaková ztráta způsobená místním odporem je vyjádřena vztahem (1.16).

$$\Delta p_M = \xi \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (1.16)$$

Kde Δp_M [Pa] je ztráta místními odpory; ξ [-] je součinitel místních ztrát; ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota tekutiny; w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je střední průtoková rychlost.

Místní ztráty jsou tedy lokalizované na poměrně krátké úseky potrubních sítí. K určení místních ztrátových součinitelů se používají výpočtové vzorce, tabulky, grafy, někdy jejich kombinace. Jsou samozřejmě zobecněním výsledků měření. Nejúplnější sbírkou těchto materiálů je obsáhlá kniha Idělčik: Příručka hydraulických odporů [1], která vychází po desetiletí opakovaně s doplňovanými údaji ze světových laboratoří, v jazyce ruském a anglickém. [4]

1.3.2.1 Ztráta náhlým zúžením proudu

Vzorec (1.17) pro výpočet ztrátového součinitele byl převzat z literatury [4].

$$\xi = 0,5 \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^{0,75} \quad (1.17)$$

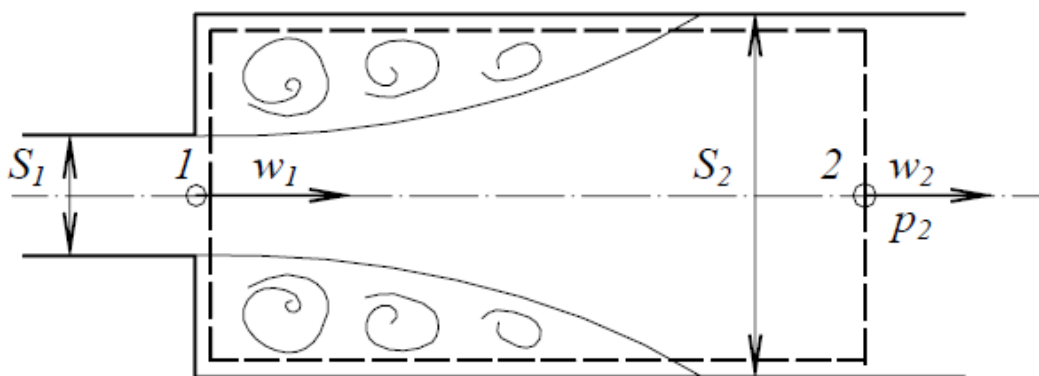
Tlaková ztráta příslušející náhlému zúžení proudu je vyjádřena rovnicí (1.18).

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{1}{2} \rho w_1^2 \quad (1.18)$$

1.3.2.2 Ztráta náhlým rozšířením proudu

Schéma bylo zobrazeno na obr. 2. Ztrátový součinitel je možné v tomto případě stanovit analyticky, z věty o změně toku hybnosti, Bernoulliho rovnice beze ztrát a rovnice kontinuity (1.19). Postup odvození je dostupný v odkazované literatuře [4].

$$\xi = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (1.19)$$



Obrázek 2 - Ztráta náhlým rozšířením proudu [4]

Tlaková ztráta příslušející náhlému rozšíření proudu je vyjádřena rovnicí (1.20).

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{1}{2} \rho w_1^2 \quad (1.20)$$

1.3.3 Místní tlakové ztráty porézních médií

1.3.3.1 Obecný popis porézních a propustných materiálů

Porézní materiály jsou charakterizovány svou schopností absorbovat a propouštět plyny a kapaliny. Porézní materiály se přirozeně vyskytují v přírodě a jsou vyráběny i pro řadu účelů.

Poréznost je obecně existence dutin nejrůznějšího tvaru v látce. Je hodnocena dle množství prázdného nebo volného prostoru v tělese. Závisí hlavně na stupni zhutnění. Pro proudění tekutin je pak rozhodující propustnost, což je objemový tok tekutiny skrze látku vyvolaný

gradientem vnějšího tlaku. Propustnost je hodnocena koeficientem propustnosti $k [m \cdot s^{-1}]$, pomocí něhož je formulován Darcyho zákon.

Porézní materiály jsou využívány v mnoha případech. Jednou z nejčastějších aplikací jsou filtry. Zde mají materiály funkci oddělení tuhých částic od proudící tekutiny. Dalším praktickým příkladem porézních materiálů jsou zeminy a horniny.

1.3.3.2 Darcyho zákon

Darcyho zákon je matematický vztah, který definuje rychlost průtoku kapaliny nebo plynu pevným porézním tělesem. Jedná se o lineární závislost mezi filtrační rychlostí tekutiny v_f (resp. průtočným množstvím Q) a piezometrickým (hydraulickým) gradientem I . Zákon vyjadřuje lineární závislost rychlosti proudění na rozdílu tlaků proudícího média a vzdálenosti sledovaných bodů. Četné experimenty ukazují, že tato lineární závislost platí pro velký rozsah hodnot hydraulického gradientu a pro většinu obvyklých hornin a zemin. Odchytky od platnosti Darcyho zákona jsou zjišťovány při malých gradientech hydraulické výšky ve velmi jemnozrnných materiálech a také u hrubozrnných materiálů, pokud gradient hydraulické výšky překročí jistou mezní hodnotu. Používá se především v hydrogeologii nebo stavebnictví při projektování způsobů odvodňování stavebních jam. Podstatné je, že množství pronikající kapaliny je přímo úměrné tlakovému gradientu, vyjádřeného jako rozdíl hydraulických výšek ($h_a - h_b$) a nepřímo úměrné protékané vzdálenosti. Velikost koeficientu propustnosti $k [m \cdot s^{-1}]$, se určuje pomocí čerpacích nebo stoupacích zkoušek případně laboratorně na neporušených vzorcích horninového materiálu. [6]

Darcyho zákon je formulován vztahem (1.21).

$$Q = kA \cdot \frac{h_a - h_b}{L} \quad (1.21)$$

Kde $Q [m^3 \cdot s^{-1}]$ je průtočné množství tekutiny; $k [m \cdot s^{-1}]$ je koeficient propustnosti; $A [m^2]$ je průtočná plocha; $(h_a - h_b) [m]$ je tlakový gradient vyjádřený pomocí změny výšky sloupce tekutiny; $L [m]$ je délka porézního média

1.3.3.3 Analytický výpočet tlakové ztráty v porézním médiu

Uvnitř porézního média dochází k tlakové ztrátě. Pokles tlaku v kanálu je dán rovnicí (1.22). Celková tlaková ztráta se skládá ze ztráty viskózní a inerciální.

$$\Delta p = \Delta p_{viscous} + \Delta p_{inercial} \quad (1.22)$$

Kde $\Delta p [Pa]$ je celková tlaková ztráta vyvolaná vloženým porézním médiem; $\Delta p_{viscous} [Pa]$ je viskózní tlaková ztráta; $\Delta p_{inercial} [Pa]$ je inerciální tlaková ztráta.

S použitím koeficientu viskózního odporu, se pokles tlaku vypočte podle Darcyho zákona upraveného do tvaru rovnice (1.23).

$$\Delta p_{viscous} = C_{viscous} \cdot \mu \cdot w \cdot \Delta x \quad (1.23)$$

Kde $C_{viscous} [m^{-2}]$ je koeficient viskózního odporu, $\mu [kg \cdot s^{-1}]$ je účinnost filtračního průřezu; $w [m \cdot s^{-1}]$ je rychlost proudění; $\Delta x [m]$ je délka média.

Inerciální pokles tlaku se vypočte podle vztahu (1.24).

$$\Delta p_{inercial} = C_{inercial} \cdot \Delta x \frac{1}{2} \cdot \rho w^2 \quad (1.24)$$

Kde $C_{inercial} [m^{-1}]$ je koeficient inerciálního odporu, $\rho [kg \cdot m^{-3}]$ je hustota tekutiny; $w [m \cdot s^{-1}]$ je rychlost proudění; $\Delta x [m]$ je délka média.

Při použití inerciálního poklesu tlaku lze z formální podobnosti výpočtových vztahů (1.16) a (1.24) na porézní oblast pohlížet jako na speciální případ místní tlakové ztráty. Kde součinitel místní ztráty je definován vztahem (1.25).

$$\xi = C_{inercial} \cdot \Delta x \quad (1.25)$$

2 CFD modelování

2.1 Matematické modelování a numerické metody

Vznik a rozvoj teorie parciálních diferenciálních rovnic byly úzce spjaty s fyzikálními vědami a se snahou popsat jazykem matematiky co možná nejpřesněji některé fyzikální děje a jevy. S nástupem nových oborů však takto vybudovaný matematický aparát nacházel uplatnění i mimo fyziku. Šíře a složitost zkoumaných problémů dala vzniknout novému odvětví nazvanému matematické modelování. Rozvojem výpočetní techniky v posledních dekadách nabývají numerické simulace na důležitosti v mnohých oblastech lidské činnosti.

Matematickým modelem rozumíme matematickou úlohu, jejíž řešení popisuje chování zkoumaného systému. Obecně je matematický model zjednodušeným matematickým popisem fyzikální reality. Problém nastává, s přesným řešením těchto matematických úloh. Obecná řešení jsou známa pouze pro některé silně zjednodušené případy.

Proto cílem numerických metod je vytvořit efektivní algoritmy pro řešení nejrůznějších matematických problémů. [7]

Zkoušením a praxí se ukazuje, že ve skutečnosti není potřeba znát řešení zcela přesně a matematicky korektně. Například funkce napětí ve strojní součásti je funkcí minimálně tří proměnných. Avšak pro návrhy součástí je rozhodující maximum této funkce, nikoliv celý její průběh po celé několika rozměrové oblasti. Protože počítač není schopen vyřešit úlohy obecně, dokáže zacházet jen se základní matematikou. Principiálně počítač vyšší matematiku nedodrží a pracuje s výpočty v konečných posloupnostech. Tyto metody predikují výsledky s určitou přesností. Neposkytují tedy přesná řešení již z principu.

Práce na počítači vyžaduje, abychom zadali na vstup konečný počet číselných údajů a postup, prostřednictvím kterého po konečném počtu kroků dojdeme k výsledku. Ten je dán opět konečným počtem výstupních číselných údajů. [7]

2.1.1 Verifikace a validace

Verifikace řešení je ověření správnosti hypotézy. Provádí se tak konfrontací důsledků hypotéz se zkušenostmi. Verifikace potvrzuje, nebo vyvrací platnost teorie. Provádí se tak experimentálně, výrobou prototypů a jejich testováním ve skutečných podmínkách. V případě numerických simulací nabývá verifikace na významu, ty poskytují jen přibližný obraz řešení již z principu. Cílem verifikace je tedy zhodnotit jeho správnost. Verifikace numerických modelů jako taková je nezbytnou částí výpočtů, její absencí ztrácejí dosažené výsledky na věrohodnosti a použitelnosti.

Validace je definovaný postup pro získání, zaznamenání a výklad výsledků požadovaných pro prokázání.

2.1.2 Úvod do CFD výpočtů

CFD výpočty jsou formou numerických výpočtů, která je specializována na oblast mechaniky tekutin. Zkratka CFD je zkratkou anglických slov Computational Fluid Dynamics, tedy výpočty v dynamice tekutin. Využívá při tom platné rovnice vycházející z teorie mechaniky tekutin. Využívá se pro vytvoření představy o průběhu proudění tekutin, přenosu tepla a hmoty, průběhu chemických reakcí a dalších fyzikálních dějích. CFD systémy využívají nejčastěji metodu konečných objemů.

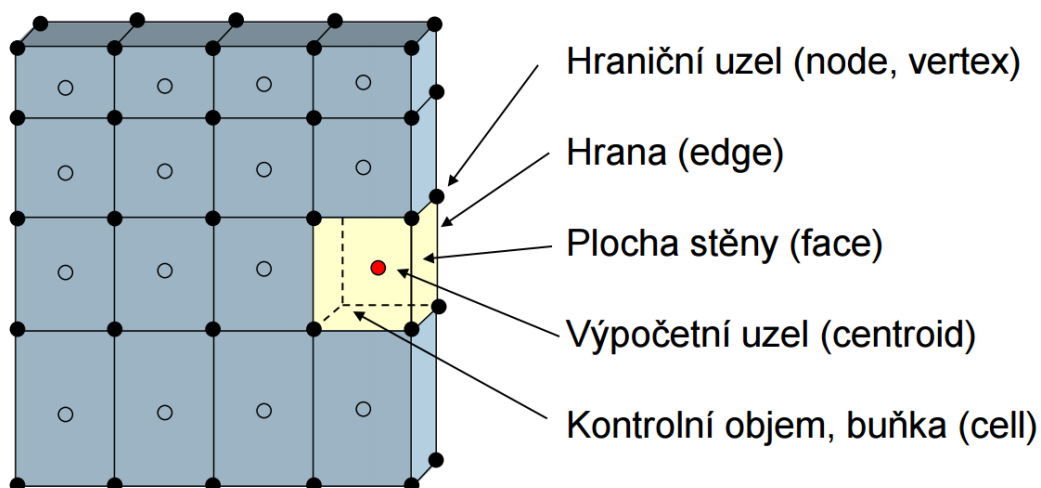
2.2 Metody řešení

Používané metody numerického řešení parciálních diferenciálních rovnic jsou:

- Metoda konečných diferencí - vychází z Taylorova rozvoje
- Metoda konečných prvků – využívána hlavně při pevnostních výpočtech
- Metoda konečných objemů – nejčastěji využívaná metoda v CFD

2.2.1 Metoda konečných objemů (MKO)

Základem MKO je rozdělení řešené oblasti na konečný počet nepřekrývajících se kontrolních objemů pomocí sítě. Základní rovnice jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic s připojením okrajových podmínek. Diskretizací je třeba chápat náhradu parciálních diferenciálních rovnic algebraickými rovnicemi. Hodnoty složek rychlostí a ostatních veličin jsou ve výpočetních uzlech, které jsou v geometrických středech konečných objemů. Hodnoty veličin na hranicích objemů se získávají interpolací. Přenos informací probíhá přes hranice objemu a vypočítá se jako suma integrálů přes jednotlivé plochy. Výsledkem je soubor lineárních algebraických rovnic, jedna pro každý objem. Hlavní výhody MKO jsou v tom, že má menší nároky na paměť a vyšší rychlost než jiné numerické metody při řešení náročných úloh. [8]



Obrázek 3 - Schéma výpočetní sítě metody konečných objemů [8]

2.3 Postup řešení

1. Vytvoření modelu geometrie
2. Pokrytí geometrie výpočetní sítí
3. Import sítě
4. Kontrola sítě
5. Výběr řešiče
6. Výběr řešených rovnic (laminární, turbulentní, chemické reakce, rovnice přenosu tepla atd.)
7. V některých případech volba přídatných modelů
8. Zadání materiálových vlastností
9. Zadání okrajových podmínek
10. Nastavení parametrů řešiče
11. Nastavení monitorů řešení
12. Inicializace proudového pole
13. Výpočet
14. Prohlížení výsledků
15. Uložení výsledků
16. V případě potřeby zjemnění sítě nebo úprava parametrů modelu (a návrat k bodu 4)

2.4 Geometrie

V CFD modelu představuje geometrie objem, ve kterém proudí určená tekutina. Objem musí být ohraničen stěnami, ty mohou být nepropustné, nebo jimi může tekutina vstupovat či vystupovat. Geometrie může být vytvořena pomocí základního programu DesignModeler obsaženého v balíku ANSYS. V praktických úlohách je však často potřeba provést analýzu proudění na reálně vyráběné součásti, využívá se proto importu parametrického modelu například z programů Autodesk Inventor, Catia, NX, SolidEdge. V těchto případech se pak provádí inverze modelu, čímž vznikne 3D objem, který vyplňuje tekutina.

2.5 Výpočetní síť

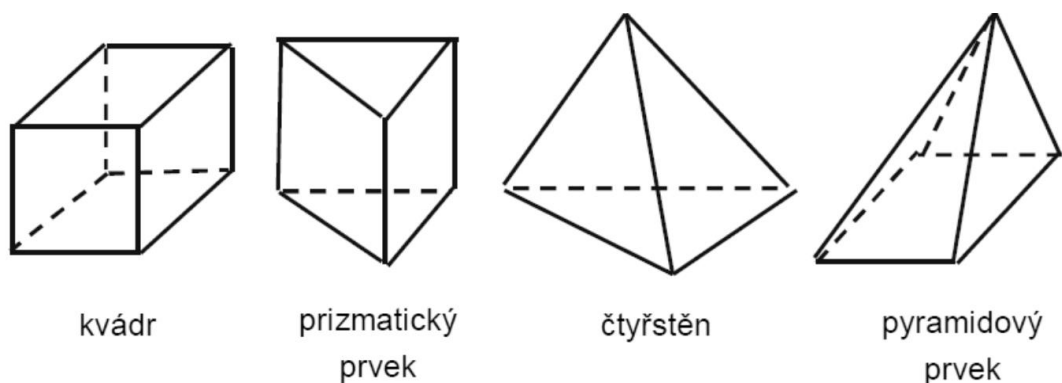
Síť představuje systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující 2D buňky ve dvoudimenzionálním prostoru nebo 3D buňky ve třídimenzionálním prostoru. Lze říci, že výpočtová oblast pokrytá sítí je základem matematického modelování. Neboť samostatný matematický model (systém matematických vztahů) je pouze „pasivním“ nástrojem, který nabývá smyslu až ve chvíli, kdy je aplikován na konkrétní problém (výpočtovou oblast pokrytou sítí). Pokud se hovoří o matematických modelech, které jsou založeny na numerickém řešení systému parciálních diferenciálních rovnic a vyžadují takto i zadání okrajových podmínek, lze konstatovat, že možnosti realizování úlohy jsou silně limitovány výkonem počítačové techniky. [9]

Platí zde několik zásad:

- výpočet je o to náročnější (pomalejší), čím více rovnic je v rámci matematického modelu do výpočtu zahrnuto (podle náročnosti a komplexnosti modelu);
- výpočet je o to náročnější, čím více má výpočtová oblast buněk;

- výpočet je o to náročnější, čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti. [9]

Numerická metoda konečných objemů je založena na vytvoření systému nepřekrývajících se elementů, konečných objemů. Původně byla metoda konečných objemů postavena na konečných objemech tvaru obdélníků a křivočarých čtyřúhelníků ve dvourozměrném případě a kvádrů nebo obecných šestistěnů v trojrozměrných úlohách (Obr. 4). Takto vytvořená síť se nazývá strukturovaná síť. Zásadním pravidlem je, že hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu, nelze tedy libovolně zhušťovat síť. Také výsledná výpočtová oblast je pak kvádr nebo obdélník. V současné době se začíná prosazovat nový přístup, kdy se buduje tzv. nestrukturovaná síť. Konečným objemem je ve 3D kvádr, čtyřstěn, prizmatický a pyramidový prvek, jehož výhody byly ověřeny v úlohách pružnosti, řešených metodou konečných prvků. [9]



Obrázek 4 - Tvar konečného objemu [9]

2.5.1 Základní typy výpočetních sítí

Výpočetní síť lze rozdělit z hlediska strukturovanosti.

- Strukturovaná

Je založena na vygenerování sítě čtyřúhelníkových prvků v rovině, nebo šestistěnných prvků v prostoru. Výhodou těchto typů sítí je snadné generování a lepší konvergence výpočtu. Strukturovaná síť je pro tyto důvody upřednostňovaná.

- Nestrukturovaná

Je založena na vygenerování sítě trojúhelníkových prvků v rovině, nebo čtyřstěnných prvků v prostoru. Tento typ sítí umožňuje snadné lokální zhušťování. Používá se tam, kde nelze použít strukturovanou síť.

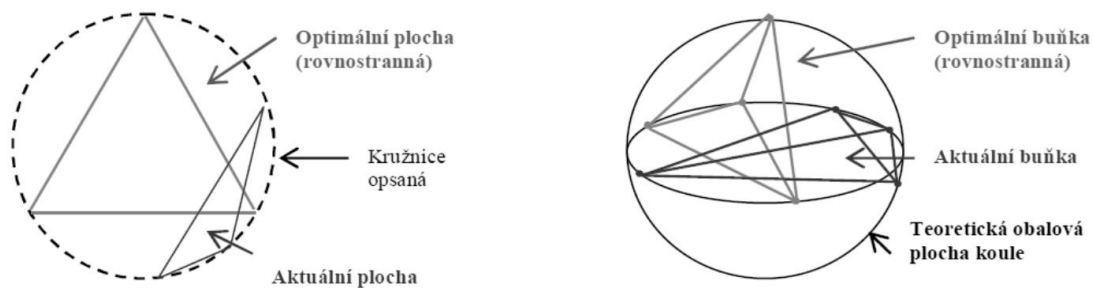
2.5.2 Kvalita výpočetní sítě

Kvalita sítě se posuzuje podle:

- velikosti buněk (s ohledem na modelovaný děj a požadavek na přesnost výpočtu)
- vhodnosti uspořádání buněk v prostoru (například zhuštění v místech zajímavých z hlediska proudění tekutin) s ohledem na konkrétní typ úlohy

- kvality buněk (nesouměrnost – Skewness, poměr hran (ploch) prvků - Aspect Ratio, atd.) [9]

Nejvýznamnějším kritériem pro posouzení kvality buňky je nesouměrnost, kdy se posuzuje, jak hodně se buňka svým tvarem blíží ideálnímu pravidelnému geometrickému tvaru v souladu s odpovídajícím schématem sítě. Pokud je buňka jakkoliv deformována, je její kvalita horší. Obecně se kvalita každé buňky vyjadřuje bezrozměrným číslem v rozsahu 0 – 1, kde 0 znamená výsledek nejlepší a naopak 1 výsledek nejhorší, tedy problematickou buňku pro výpočty. Tato hodnota se nazývá „míra skosení buňky“ (angl. „skewness measure“) neboli také míra deformace. [9]



Obrázek 5 - Princip posuzování kvality 2D a 3D buňky [9]

Pro určení kvality 2D buňky, resp. míry její deformace slouží následující vztah:

$$Skewness\ measure(TRI) = \frac{S_{optional} - S_{real}}{S_{optional}} \quad (2.1)$$

$S_{optional}$ představuje „optimální plochu buňky“; S_{real} pak „reálnou plochu buňky“

Pro určení kvality 3D buňky odpovídající schématu sítě tvořené čtyřstěny platí vztah obdobný:

$$Skewness\ measure(TET) = \frac{V_{optional} - V_{real}}{V_{optional}} \quad (2.2)$$

$V_{optional}$ představuje „optimální objem buňky“; V_{real} pak „reálný objem buňky“

3 Modelování porézních médií v ANSYS Fluent

Model porézního média lze použít pro širokou škálu jednofázových a vícefázových oblastí na příklad jsou to filtrační papíry, děrované desky, distributory proudění a seskupení trubek. Je-li použit tento model, může být definován přenos tepla přes médium. Dále může být definován předpoklad tepelné rovnováhy mezi médiem a tokem proudící tekutiny.

3.1 Porous jump

Označení „porous jump“ lze přeložit jako porézní skok. Jedná se o jednodimenzionální zjednodušení modelu porézního média. Tento model může být použit pro modelování tenké membrány, kde jsou známé rychlosti nebo pokles tlaku. Model porézního skoku se tedy aplikuje na plošné zóny, nikoli na mobilní, a měl by být použit na místo úplného modelu porézního média vždy, když je to možné. Prokazuje vyšší robustnost a poskytuje lepší konvergenci.

3.2 Omezení a předpoklady modelu porézních materiálů

Modely porézních médií obsahují empiricky stanovený odpor proudění v oblasti modelu, který je definován jako porosita. V podstatě lze říci, že model porézního média dodává propad hybnosti v řídicí rovnici hybnosti. V důsledku toho by měly být při modelování respektovány tyto předpoklady a omezení.

- Vliv porézního média na pole turbulence je pouze orientační
- V obecném nastavení ANSYS Fluent platí, že pórovitost porézního média pro je izotropní a může se lišit v závislosti na prostoru a čase
- Formulace povrchové a fyzické rychlosti je využitelná pro jednofázové i vícefázové porézní média
- Odpor hybnosti porézního média a zdroj tepla je vypočten samostatně pro každou fázi
- Interpolace tlaku se vždy používá uvnitř porézních zón bez ohledu na tlak, který byl vybrán jako schéma na stránce metody řešení úloh
- Interakce mezi porézním materiálem a rázovými vlnami nejsou brány v úvahu
- Pro modelování porézních médií je doporučena standardní iniciace výpočtu. Výchozí hybridní metoda inicializace nebere v úvahu vlastnosti porézních médií a v závislosti na okrajových podmínkách, může způsobit nerealistické počáteční rychlostního pole. Hybridní metoda inicializace může být použita pouze s konstantním vektorem rychlosti.

3.2.1 Povrchová a fyzická rychlost „superficial, physical velocity“

Formulace povrchové rychlosti předpokládá, že rychlost uvnitř porézního média je závislá pouze na objemovém průtoku. Děje se tak, s cílem zajistit kontinuitu vektorů rychlosti přes rozhraní porézního média. Formulace povrchové rychlosti nebere v úvahu pórovitost při výpočtu konvekce a difúze v transportních rovnicích. Lze užít přesnější alternativu, ve které se skutečná, fyzická rychlost vypočítá uvnitř porézního média a pórovitost je zahrnuta v derivačních členech transportních rovnic.

3.3 Rovnice hybnosti porézního média

Formulace povrchové rychlosti v porézní zóně obecně dává dobré reprezentace hromadné ztráty tlaku. Nicméně protože hodnoty rychlosti uvnitř porézní oblasti zůstávají stejné jako mimo porézní oblast, tento model nemůže předvídat zvýšení rychlosti v porézních zónách. Přesnost modelu je proto omezena.

Porézní média jsou modelovány přidáním zdrojového členu hybnosti do standardní rovnice proudění tekutin. Tato hybnost přispívá k tlakovému gradientu v porézní buňce, vytváří tlakový spád, který je úměrný k rychlosti tekutiny nebo k její druhé mocnině.

Přidaná hybnost se skládá ze dvou částí:

- viskózní ztráty - Darcy, první člen na pravé strana rovnice (3.1)
- inerciální ztráty - druhý člen na pravé straně strana rovnice (3.1)

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (3.1)$$

Kde S_i je zdrojový člen rovnice hybnosti ve směrech (x,y,z) ; $|v|$ je velikost rychlosti; C_{ij} a D_{ij} jsou matice předepisující vlastnosti porézní zóny v jednotlivých směrech.

V případě homogenních porézních médií dojde ke zjednodušení rovnice (3.1) na tvar (3.2). Matice C_{ij} a D_{ij} jsou v tomto případě diagonální. Matice D_{ij} má na hlavní diagonále hodnoty $\frac{1}{\alpha}$, matice C_{ij} má na hlavní diagonále hodnoty C_2 .

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (3.2)$$

Kde α je propustnost a C_2 je inerciální odporový faktor

ANSYS Fluent také umožňuje zdrojový člen modelovat jako mocninnou závislost na velikosti rychlosti. Tento model platí pouze pro izotropní média.

$$S_i = -C_0 |v|^{C_1} = -C_0 |v|^{(C_1-1)} v_i \quad (3.3)$$

Kde C_0 a C_1 jsou uživatelem definované empirické koeficienty v jednotkách SI.

3.3.1 Darcyho zákon v porézních médiích

V laminárním proudění tekutin je pokles tlaku z pravidla úměrný rychlosti. V rovnici (3.1) lze konstantu C_2 považovat za nulovou. Ignorováním konvektivního zrychlení a difúze, porézního média je získán vztah označovaný jako Darcyho zákon.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (3.4)$$

Pokles tlaku pak ANSYS Fluent počítá ve třech směrech (x,y,z).

$$\nabla p_x = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x \quad (3.5)$$

$$\nabla p_y = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y \quad (3.6)$$

$$\nabla p_z = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z \quad (3.7)$$

Kde $\frac{1}{\alpha_{ij}}$ jsou složky v matici D rovnice (3.2), v_j jsou složky rychlosti ve směrech x,y,z; $\Delta n_{x,y,z}$ jsou velikosti média v jednotlivých směrech

3.3.2 Inerciální Ztráty v porézních

Při vysokých rychlostech proudění konstanta C_2 v rovnici (3.1) zajišťuje korekci inerciálních ztrát v porézním médiu. Na tuto konstantu lze pohlížet jako na součinitele prostupu na jednotku délky podél směru toku. Tím je umožněn model poklesu tlaku, který má být specifikován v závislosti na dynamickém členu.

Při modelování děrovaného plechu nebo soustavy trubek, lze někdy zanedbat propustnost. To znamená, eliminovat viskosní ztráty v rovnici (3.1). Použít tedy inerciální ztráty samostatně, čímž se získá následující zjednodušený tvar rovnice porézního média.

$$\nabla p = -\sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (3.8)$$

Rozepsáním do směrů x,y,z

$$\nabla p_x = \sum_{j=1}^3 C_{2xj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho v_j |v| \quad (3.9)$$

$$\nabla p_y = \sum_{j=1}^3 C_{2yj} \Delta n_y \frac{1}{2} \rho v_j |v| \quad (3.10)$$

$$\nabla p_z = \sum_{j=1}^3 C_{2zj} \Delta n_z \frac{1}{2} \rho v_j |v| \quad (3.11)$$

$\Delta n_{x,y,z}$ jsou opět velikosti média v jednotlivých směrech definované modelem

3.4 Úprava energetické rovnice v porézních médiích

ANSYS Fluent řeší v energetickém standardu transportní rovnice v porézní oblasti s úpravami vodivosti toku a jen přechodových podmínek. Energetická rovnice zapsaná dle literatury [3].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v}) \right) + S_h \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.4.1 Model rovnice tepelné rovnováhy

Pro simulace, u kterých je předpokládána teplotní rovnováha porézního média a proudící tekutiny, vodivý tok v porézním materiálu se používá účinné vodivosti a přechod tepla je zahrnut v tepelné setrvačnosti pevných částí porézního média.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1 + \gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) \\ & = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \left(\sum_j h_j \vec{J}_j \right) + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v}) \right) + S_f^h \end{aligned} \quad (3.13)$$

Kde E_f je celková energie tekutiny; E_s je celková energie pevného média; ρ_f je hustota tekutiny; ρ_s je hustota pevného média; γ je porozita média; k_{eff} je efektivní tepelná vodivost média; S_f^h je entalpie tekutiny

Efektivní (účinná) tepelná vodivost v porézním médiu se vypočítá jako vážený průměr vodivosti kapaliny a vodivosti pevné látky dle vztahu (3.14).

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma)k_s \quad (3.14)$$

Kde k_f je tepelná vodivost tekutiny (zahrnující turbulentní část k_t); k_s je tepelná vodivost pevné látky

3.4.2 Model rovnice tepelné nerovnováhy

Pro simulace, ve kterých se nepředpokládá teplotní rovnováha porézního média a proudící tekutiny se uplatňuje přístup „dual cell“. Pokud jde o přenos tepla pak v takovém přístupu pevná zóna, která je prostorově shodná s porézní zónou, interaguje pouze s kapalinou. Rovnice zachování energie jsou řešeny odděleně pro kapalnou a pevnou zónu. Rovnice (3.15) je rovnice zachování energie pro kapalnou zónu. Rovnice (3.16) je rovnice zachování energie pro pevnou zónu.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\gamma \rho_f E_f) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) & \quad (3.15) \\ = \nabla \cdot \left(\gamma k_f \nabla T_f - \left(\sum_i h_i \vec{J}_i \right) + (\bar{\tau} \vec{v}) \right) + S_f^h \\ + h_{fs} A_{fs} (T_s - T_f) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}((1 - \gamma) \rho_s E_s) = \nabla \cdot ((1 - \gamma) k_s \nabla T_s) + S_s^h + h_{fs} A_{fs} (T_s - T_f) \quad (3.16)$$

Kde E_f je celková energie tekutiny; E_s je celková energie pevného média; ρ_f je hustota tekutiny; ρ_s je hustota pevného média; γ je porozita média; k_f je tepelná vodivost kapalné fáze; k_s je tepelná vodivost pevné fáze; h_{fs} je koeficient přestupu tepla pro kapaliny nebo pevné fáze; A_{fs} je poměr plochy kapaliny a pevné fáze; T_f je teplota kapaliny; T_s je teplota pevné fáze; S_f^h je entalpie tekutiny; S_s^h je entalpie pevné fáze

3.5 Turbulence v porézních médiích

Pro výpočet množství turbulence v porézním médiu řeší ANSYS Fluent ve výchozím nastavení standardní rovnice. V tomto výchozím přístupu se turbulence v médiu zpracuje, jako by se jednalo o pevnou látku, a tedy nemá žádný vliv na generování velikosti turbulence

nebo rozptylu. Tento předpoklad může být rozumný, je-li propustnost v médium poměrně velká a geometrické měřítko média není srovnatelné s měřítkem turbulentních vírů.

V jiných případech však může být požadováno potlačení účinků turbulence v médiu. To lze při použití některého z modelů turbulence, povolením možnosti „Laminar Zone“.

3.6 Vliv pórovitosti na skalární rovnice

Pro výpočty proudění v porézních médiích, kde je efekt porozity časově proměnný. Je připočten člen změny porozity na časové změně do všech pohybových skalárních rovnic a rovnice kontinuity. Efekt porozity je aktivován ve standartním nastavení na hodnotu 1.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho\phi) \quad (3.17)$$

Kde γ je porozita

3.7 Uživatelské vstupy pro porézní média [3]

Pro modelování porézních médií je nutné definovat tyto uživatelské vstupy.

- Definice porézní zóny
- Definice formulace porézní rychlosti (volitelný)
- Identifikace kapaliny protékající porézním médiem
- Aktivace reakcí v porézní zóně
- Zahrnutí relativní odporové rychlosti do formulace odporu
- Nastavení viskózního a inerciálního odporu
- Postup nastavení odporových koeficientů
- Definice poréznosti
- Definice nastavení přestupu tepla
- Povolení zdrojových členů
- Definice veškerých fixních hodnot (volitelné)
- Nastavení potlačení turbulentní viskozity v porézní oblasti
- Nastavení osy otáčení a zóny pohybu

3.7.1 Definice porézní zóny

Porézní zóna je modelována jako zvláštní typ zóny tekutiny. Indikace toho, že zóna tekutiny má být modelována jako porézní, se provede povolením možnosti porézní zóny v dialogovém okně tekutiny.

3.7.2 Definice formulace porézní rychlosti (volitelný)

Na stránce okrajových podmínek je obsažena možnost výběru formulace rychlosti. Ve výchozím stavu je nastavena povrchová rychlost.

3.7.3 Identifikace kapaliny protékající porézním médiem

Definování tekutiny, která prochází přes porézní médium, se provede výběrem příslušné tekutiny v položce „material name“.

3.7.4 Aktivace reakcí v porézní zóně

Při modelování proudění s reakcemi, lze povolit tyto reakce v porézní zóně. Nastavení je prováděno v dialogovém okně pod kartou „reaction“, výběrem reakčního mechanismu. Pokud daný mechanismus reakce obsahuje reakce na stěnách, je nutné zadat hodnotu poměru povrchu a objemu. Tato hodnota je plocha povrchu pórů na stěně na jednotku objemu $\frac{A}{V}$, a může být chápána jako míra zatížení katalyzátoru. S touto hodnotou je ANSYS Fluent schopen vypočítat celkový povrch, na kterém probíhá reakce. Pro každou buňku je vynásoben tento poměr jejím objemem.

3.7.5 Zahrnutí relativní odporové rychlosti do formulace odporu

Ve výchozím nastavení je tato možnost již povolena a bere v úvahu pohybující se porézní média. Pro případy pohybující se sítě, dynamické sítě nebo pohybující se vztažné soustavy umožňuje volba relativní odporové rychlosti, lépe předvídat zdroje porézního média. Zdroje porézního média jsou vypočteny za použití stejných relativních rychlostí v porézní zóně. Formulace relativní odporové rychlosti funguje dobře pro případy s pohyblivými a stacionárními porézními médii. Ve výchozím nastavení je zapnuta.

3.7.6 Nastavení viskózního a inerciálního odporu

Nastavení viskózního odporu spočívá v definování matice D_{ij} v rovnici (3.1) nebo koeficientu $\frac{1}{\alpha}$ v rovnici (3.2) a nastavení inerciálního odporu tedy matice C_{ij} v rovnici (3.1) nebo koeficientu C_2 v rovnici (3.2). Případně upřesnit koeficienty pro energetický model koeficienty C_0 ; C_1 v rovnici (3.3).

Viskózní a inerciální koeficienty odporu jsou definovány stejným způsobem. Základním požadavkem pro stanovení koeficientů pomocí kartézského souřadného systému je definice jednoho směrového vektoru ve 2D úlohách, v prostorových úlohách pak dva směrové vektory. Dále již lze určit viskózní a inerciální koeficienty odporu v jednotlivých směrech. V rovinných (2D) úlohách je druhý směrový vektor, kolmý na zadaný. V prostorových (3D) úlohách je třetí směrový vektor kolmý na rovinu určenou dvěma prvními vektory a druhý směrový vektor musí být kolmý na první. Při nedodržení tohoto požadavku ANSYS Fluent zanedbá zadaný druhý a modifikuje ho, bere v úvahu pouze první. Je možné definovat viskózní a inerciální odporové koeficienty v každém směru pomocí uživatelem definované funkce (UDF).

Pro modelování osově souměrného vířícího toku, lze určit další směr pro viskózní a inerciální odporové koeficienty. Tento směr je vždy tangenciální k dalším dvěma směrům. V prostorových (3D) úlohách, je také možné definovat směry pomocí kónického nebo válcového souřadnicového systému.

3.7.6.1 Postup nastavení odporových koeficientů

1. Určení směrových vektorů

Při použití kartézského souřadnicového systému se určí vektory v kartézských souřadnicích. Nespecifikovaný směr se určí, jak bylo popsáno. Tyto směrové vektory musejí korespondovat se systémem porézního média.

2. Určení odporových koeficientů

Odporové koeficienty je nutné určit v každém směru. V případech porézních médií, které obsahují vysoce anizotropní setrvačný odpor, je vhodné povolit formulaci alternativní inerciální odporu „Alternative Formulation“. Tato volba zajišťuje lepší stabilitu výpočtu. Tlaková ztráta, která je způsobena médiem, závisí na velikosti vektoru rychlosti v i -té složky v médiu. Za použití alternativní formulace je z rovnice (3.4) získán výraz (3.18).

$$S_i = \frac{1}{2} \rho C_i v_i |v_i| \quad (3.18)$$

V případě izotropního média jsou odporové koeficienty ve všech směrech stejné. Je potřeba nastavit stejnou hodnotu ve všech třech směrech.

3.7.7 Definice poréznosti

Definice poréznosti média se provede zadáním koeficientu pórovitosti v dialogovém okně. Hodnota musí být v rozmezí od 0 do 1. Limitní hodnoty nejsou povoleny pro modely tepelné nerovnováhy. Poréznost lze také definovat uživatelskou funkcí.

Porozita γ , je objemový podíl tekutiny uvnitř porézní oblasti. Hodnota porozity ovlivňuje rovnici tepelné rovnováhy, tedy rovnici (3.13). Dále pak ovlivňuje časovou derivaci skalární transportní rovnice pro nestacionární proudění, viz rovnice (3.17).

3.7.8 Definice nastavení přestupu tepla

Přestup tepla v porézním materiálu lze modelovat s předpokladem teplotní rovnováhy mezi médiem a proudící tekutinou.

3.7.8.1 Model tepelné rovnováhy

Pro definování tepelné rovnováhy, je nutné zvolit v položce „Heat Transfer“ možnost „Equilibrium“. Tato možnost je nastavena jako výchozí. Dále je nutné určit materiál v porézním látce. Provede se tam v rozbalovacím seznamu. Zvolený materiál může být dále upraven. Tepelná vodivost materiálu, může být definována uživatelskou funkcí, pro možnost definování neizotropní tepelné vodivosti.

3.7.8.2 Model tepelné nerovnováhy

Předpoklad teplotní rovnováhy není vhodný pro všechny simulace. Přítomnost různých geometrických měřítek (například velikosti pórů) a fyzikální vlastnosti pevné a kapalné fáze může mít za následek lokální teplotní rozdíly mezi fázemi. Příklady, kdy je vhodné uplatnit model tepelné nerovnováhy, jsou práce s výfukovými plyny, palivové články, a katalyzátory. Model tepelné nerovnováhy není k dispozici pro radiaci a multifázový model.

Model tepelné nerovnováhy je založen na takzvaném přístupu „dvoji buňky“. Tento přístup spočívá v současném řešení dvou prostorově shodných zón, kde jedna má vlastnosti pevné látky a vlastnosti porézní tekutiny. Obě zóny jsou řešeny současně a jsou spojeny pouze prostřednictvím přenosu tepla.

V nastavení je třeba definovat, dle rovnic (3.15) a (3.16), A_{fs} tedy poměr plochy kapaliny a pevné fáze a h_{fs} koeficient přestupu tepla pro kapaliny nebo pevné fáze. Tyto parametry lze opět definovat jako konstantní, nebo dle uživatelských funkcí.

3.7.9 Povolení zdrojových členů

Pro zahrnutí tepelných účinků porézního média v energetické rovnici, lze povolit možnost zdrojových členů „source terms“ a nastavit nenulový zdroj energie. Dále lze definovat zdroje hmoty, hybnosti, turbulence, a dalších skalárních veličin.

3.7.10 Definice veškerých fixních hodnot (volitelné)

Při nestacionárním řešení, může být vhodnější stanovit hodnotu jedné nebo více proměnných v oblasti tekutiny jako konstantní než jako vypočítané. Lze to provést povolením možnosti „fixed values“.

3.7.11 Nastavení potlačení turbulentní viskozity v porézní oblasti

Pokud je to vhodné, lze potlačit turbulentní viskozitu volbou „laminar zone“, jak je uvedeno v kapitole Turbulence v porézních médiích.

3.7.12 Nastavení osy otáčení a zóny pohybu

Vstupy pro osu otáčení a zóny pohybu, jsou stejné jako u standardní tekutiny.

3.8 Modelování porézních médií s použitím formulace fyzické rychlosti

Jak je uvedeno v kapitole Omezení a předpoklady modelu porézních materiálů, ve výchozím nastavení ANSYS Fluent počítá s povrchovou rychlostí. Založenou na objemovém průtoku. Povrchová rychlost je v řídicí rovnici reprezentována dle rovnice (3.19).

$$v_{superficial} = \gamma \cdot v_{physical} \quad (3.19)$$

Kde γ je pórovitost je média definovaná jako poměr objemu tekutiny v celkovém objemu.

Hodnoty povrchové rychlosti uvnitř porézní oblasti zůstávají stejné jako ty ve vnějším prostoru. Pórovitost se nebere v úvahu v diferenciálním tvaru. Tento předpoklad omezuje přesnost porézního modelu v případech, kdy by mělo dojít ke zvýšení rychlosti v celé porézní oblasti. Výsledky jsou výrazně nepřesné, pokud jsou tyto hodnoty důležité. Pro přesnější simulaci proudění porézními médii, je nezbytné provádět řešení pomocí formulace fyzikální rychlosti.

V ANSYS Fluent je počítán vstupní tok hmoty na základě povrchové rychlosti. Proto je pro stejný hmotnostní průtok na vstupu a stejné odporové koeficienty, vypočítaný tlakový spád stejný při použití fyzické i povrchové rychlosti. Při použití formulace fyzické rychlosti dojde k úpravě základních rovnic proudění tekutin.

3.9 Strategie řešení pro porézní média

Při použití standardních postupů modelování porézního média, se může výrazně zpomalit míra konvergence úlohy. Nastává tak v případech, kdy je pokles tlaku relativně velký ve směru proudění, buď je propustnost α příliš malá, nebo koeficient moc velký. Tato pomalá konvergence může nastat v důsledku toho, že se pokles tlaku média jeví jako zdroj hybnosti. Nejlepším řešením špatné konvergence je poskytnout dobrý počáteční odhad pro pokles tlaku.

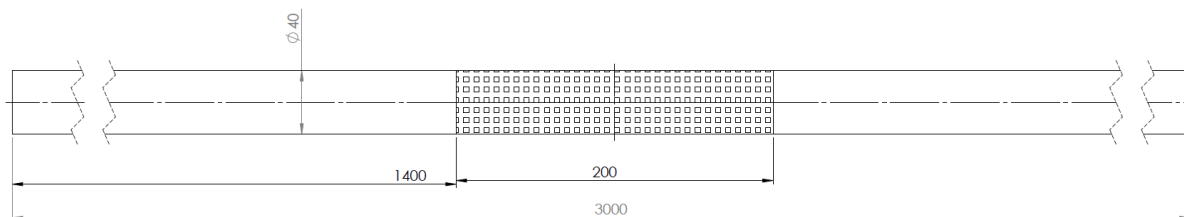
Pro modelování porézních médií je doporučena standardní metoda inicializace. Výchozí hybridní metoda nevysvětluje vlastnosti porézních médií, a v závislosti na okrajových podmínkách, může způsobit nerealistické rychlostního pole. Hybridní metoda by měla být použita pouze v případech konstantní rychlosti.

Simulace zahrnující vysoce anizotropní porézní média může, představovat konvergenční problém. Tyto problémy lze řešit omezením anizotropie médií, tedy omezením velikosti odporový koeficientů na 3 řády. Lze tak provést i v případě, že je odpor v jednom směru nekonečný.

4 Řešení úlohy porézního média

4.1 Definice úlohy

První úloha je model porézního materiálu v trubici zobrazený na schématu na obr. 606. Úloha může představovat praktický příklad filtračního média. Filtr je zde představován porézním médiem umístěným v trubici, jedná se tedy o zjednodušení přímého modelování. V praxi je nezbytné mít představu o tlakové ztrátě v tomto úseku potrubí.



Obrázek 6 - Schéma úlohy 1

Pro výpočet tlakové ztráty je určující proudící médium, jeho vstupní rychlost, geometrie úlohy a definice porézního média. Parametry byly definovány v tab. 1.

Tabulka 1 - Parametry úlohy 1

Veličina	Označení	Jednotka	Hodnota
Proudící médium		-	Voda
Teplota		[°C]	20
Hustota		[kg.m ⁻³]	998,2
Dynamická viskozita		[Pa.s]	1,002. 10 ³
Kinematická viskozita		[m ² s ⁻¹]	1,00310 ⁻⁶
Průměr trubice	D	[m]	0,04
Délka materiálu	L_p	[m]	0,2
Celková délka	L	[m]	3
Koeficient inerciálního odporu	$C_{inercial}$	[m ⁻²]	10 000
Koeficient viskózního odporu	$C_{viscous}$	[s ⁻¹]	8.10 ⁻⁸

Tlak atmosféry	p_{atm}	[Pa]	101 325
Vstupní rychlost	w_1	[m.s ⁻¹]	1

4.2 Teoretický výpočet

Výpočet tlakové ztráty daného potrubí byl proveden jako součet ztráty vyvolané porézním médiem a třecích ztrát. Teoretické výpočty tlakové ztráty vloženým porézním médiem byly provedeny dle literatury [1].

Stanovení reynoldsova čísla

Dosazením do vztahu (1.8) hodnot z tab. 1 byla stanovena hodnota reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{wD}{\nu} = \frac{1 \cdot 0,04}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 39\,880[-] \quad (4.1)$$

Výpočet tlakové ztráty

Pro výpočet třecího odporu byl vypočítán součinitel třecí ztráty dle vztahu (1.13). Vliv viskózního odporu je oproti inerciálnímu zanedbatelně malý, proto byly dosazeny parametry dle tab. 1 pouze do vztahu (1.24).

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{398\,80}} = 0,022 \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} p_0 &= C_{inercial} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho w^2 \cdot L_p + \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (4.3) \\ &= 10\,000 \cdot \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot 1^2 \cdot 0,2 + 0,022 \cdot \frac{2 \cdot 1,4}{0,04} \\ &\quad \cdot \frac{998,2 \cdot 1^2}{2} = \mathbf{998\,201,54 [Pa]} \end{aligned}$$

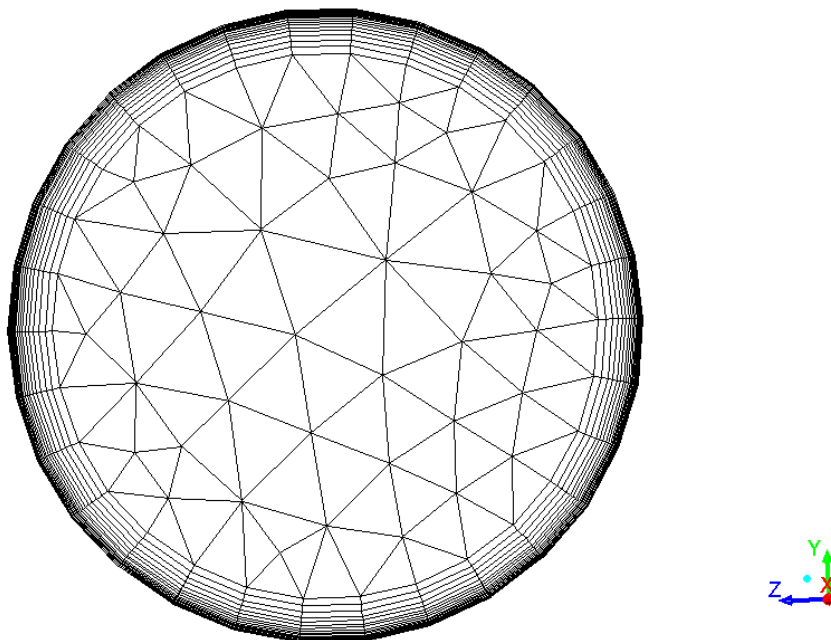
4.3 Numerický výpočet

V programu ANSYS DesignModeler byla namodelována geometrie dle schématu. V programu ANSYS Meshing byly navrženy 2 sítě, jejichž parametry byly zaznamenány do tab. 2.

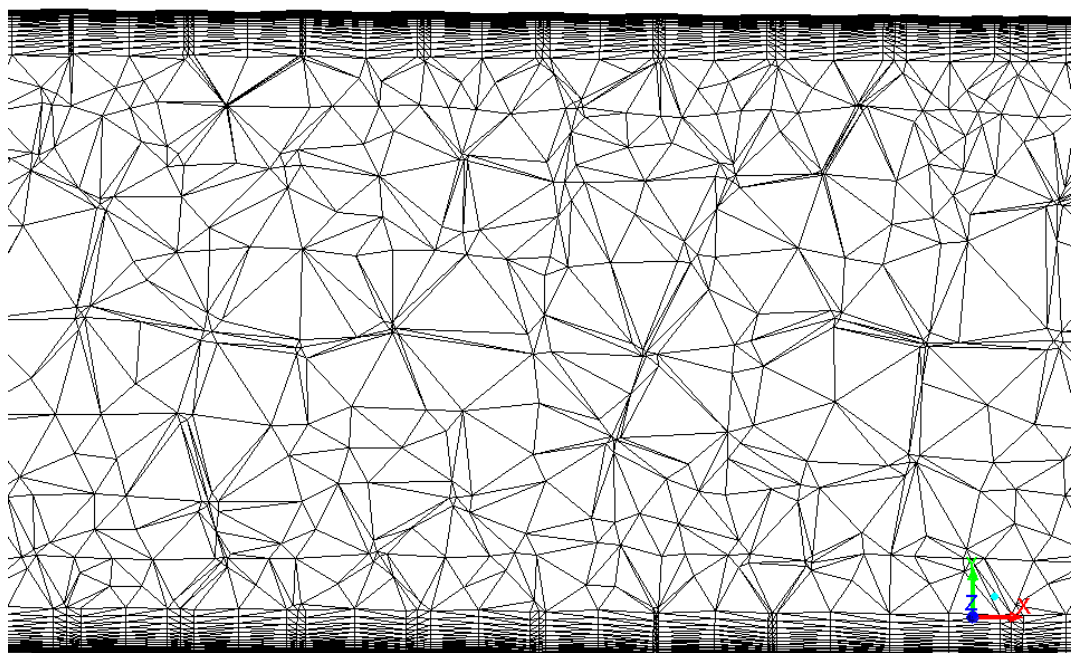
Tabulka 2 - Parametry navržených sítí

Parametr sítě	Sít' 1	Sít' 2
Elementy	Tetra dominantní	Hexahedrální
Maximální velikost buňky	10 mm	10 mm
Tloušťka první vrstvy (FLT)	0,015 mm	0,015 mm
Počet vrstev zhuštění	20	20
Růst zhuštění	1,2	1,2
y+	5,6	5,2
Počet elementů	1 202 621	469 950

Na obr. 7 byla zobrazena první, tetra dominantní, výpočtová síť v příčném řezu. Na obr. 8 byla zobrazena síť v řezu podélném.

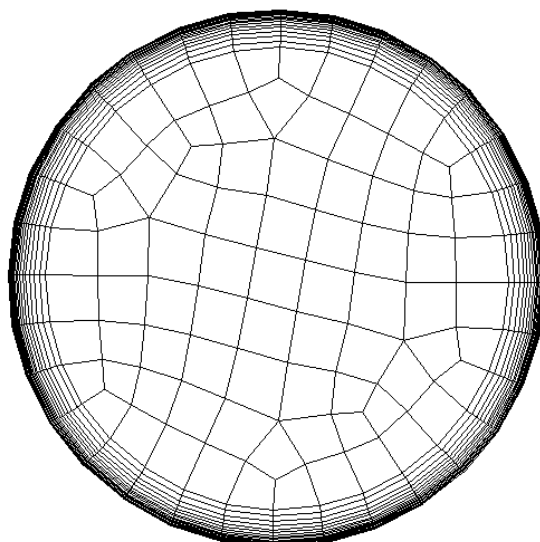


Obrázek 7 - Síť 1 v příčném řezu

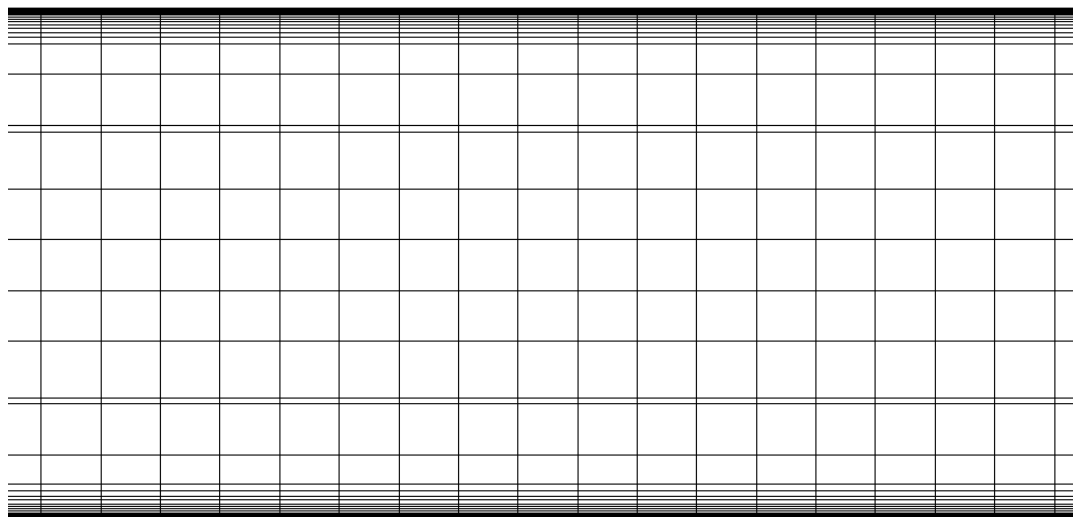


Obrázek 8 - Síť 1 v podélném řezu

Na obr. 9 byla zobrazena druhá, hexahedrální, výpočtová síť v příčném řezu. Na obr. 10 byla zobrazena síť v řezu podélném.



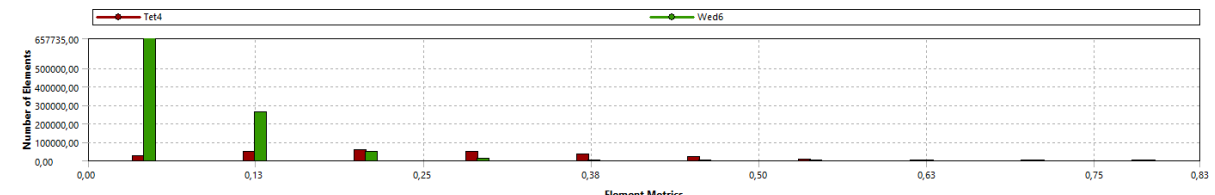
Obrázek 9 - Síť 2 v příčném řezu



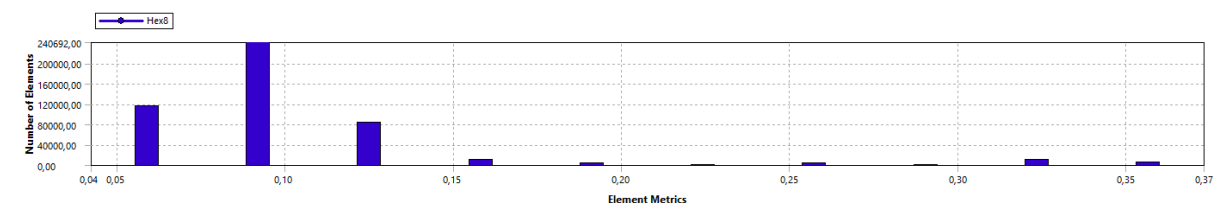
Obrázek 10 - Síť 1 v podélném řezu

Kvalita sítě

Jak bylo popsáno v teoretické části práce, kvalita sítě je rozhodující pro průběh výpočtu. Na obr. 11 a 12 je zobrazeno kvalitativní zhodnocení obou výpočtových sítí pomocí skewness. Kvalita použitých sítí byla hodnocena jako dostatečná. Výpočetní čas při paralelním chodu 4 procesů byl řádově 20 minut. Další vylepšení výrazně prodloužilo výpočetní čas a neposkytlo výrazné zpřesnění výsledků.



Obrázek 11 - Hodnocení kvality sítě 1 pomocí skewness



Obrázek 12 - Hodnocení kvality sítě 2 pomocí skewness

Použité nastavení a výsledky

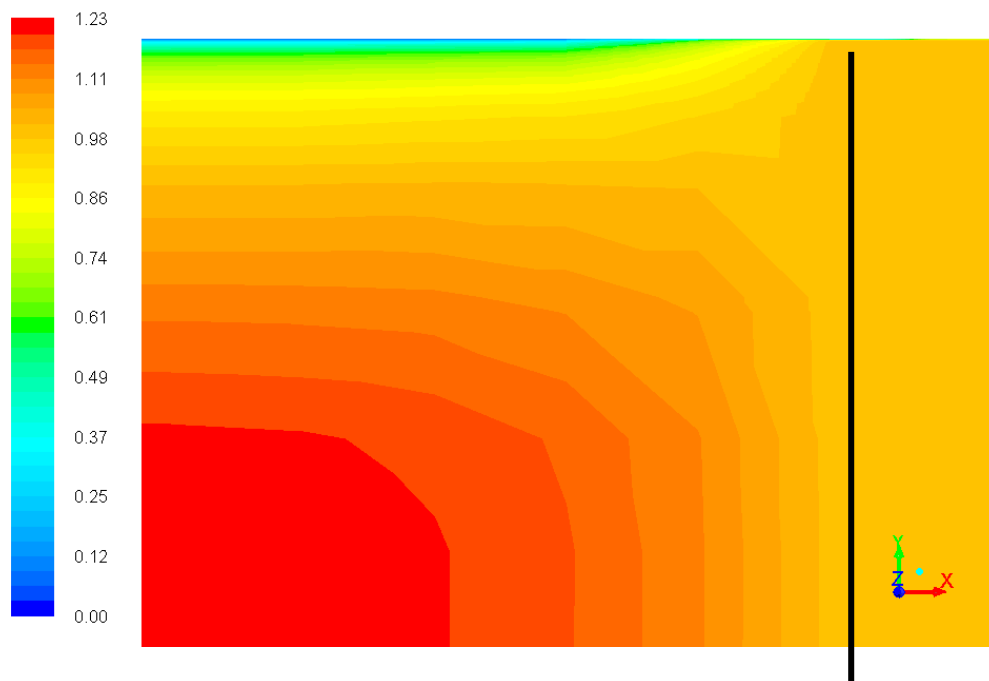
Pro řešení úlohy byl použit dvourovnicový turbulentní model $k - \omega SST$. Ten je založen na kombinaci originálního modelu $k - \varepsilon$ a $k - \omega$. Výsledky tlakové ztráty byly vypsány do tab.3.

Tabulka 3 - Výsledky výpočtů

Výpočet pro síť 1	1 037 937,1 [Pa]
Výpočet pro síť 2	1 043 126,4 [Pa]

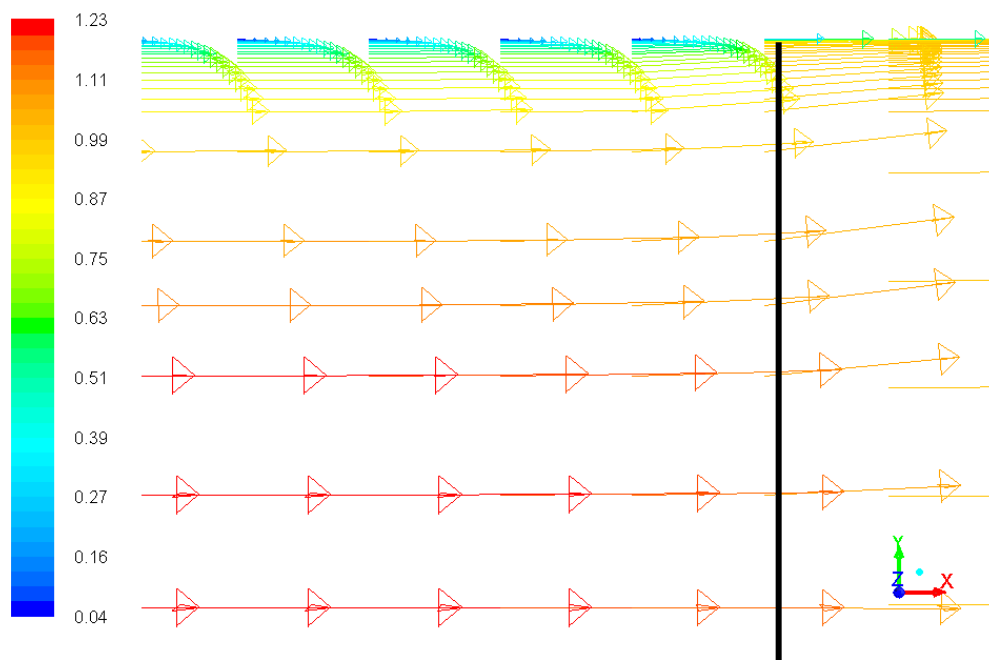
Grafické výsledky numerického modelování

Na obr. 13 byly zobrazeny kontury rychlosti na vstupu tekutiny do porézního média, vyznačeno černou čarou. Z uvedeného obrázku je patrná konstantní rychlost proudění porézní zónou, to odpovídá popisu v teoretické části práce.



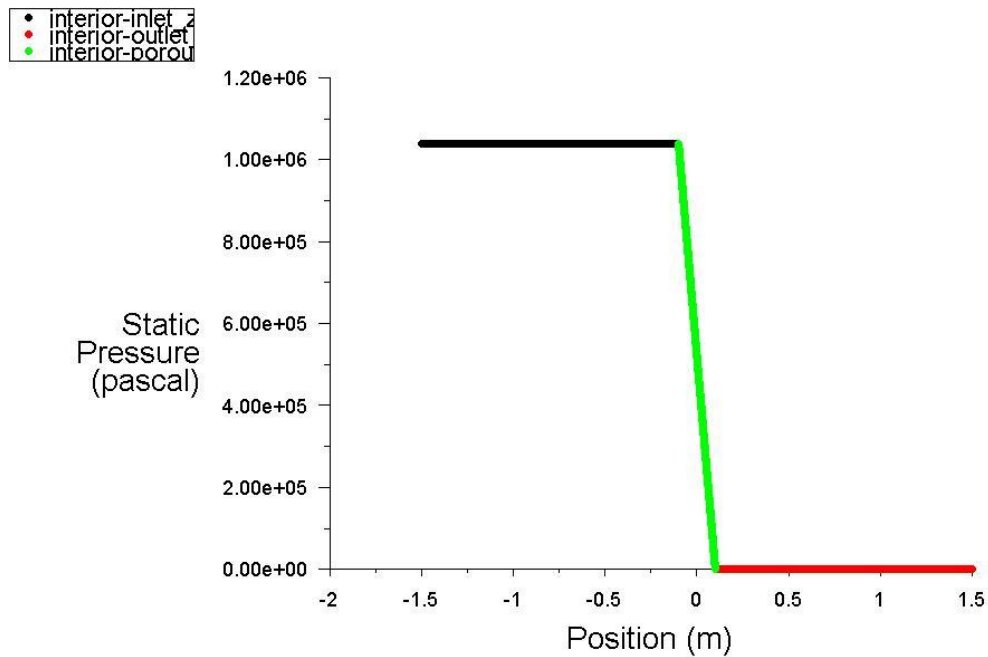
Obrázek 13 - Kontury rychlosti na vstupu porézní zóny

Na obr. 14 byly zobrazeny vektory rychlosti na vstupu tekutiny do porézního média, vyznačeno černou čarou. Opět je patrná konstantní rychlost uvnitř porézní zóny i u stěny.



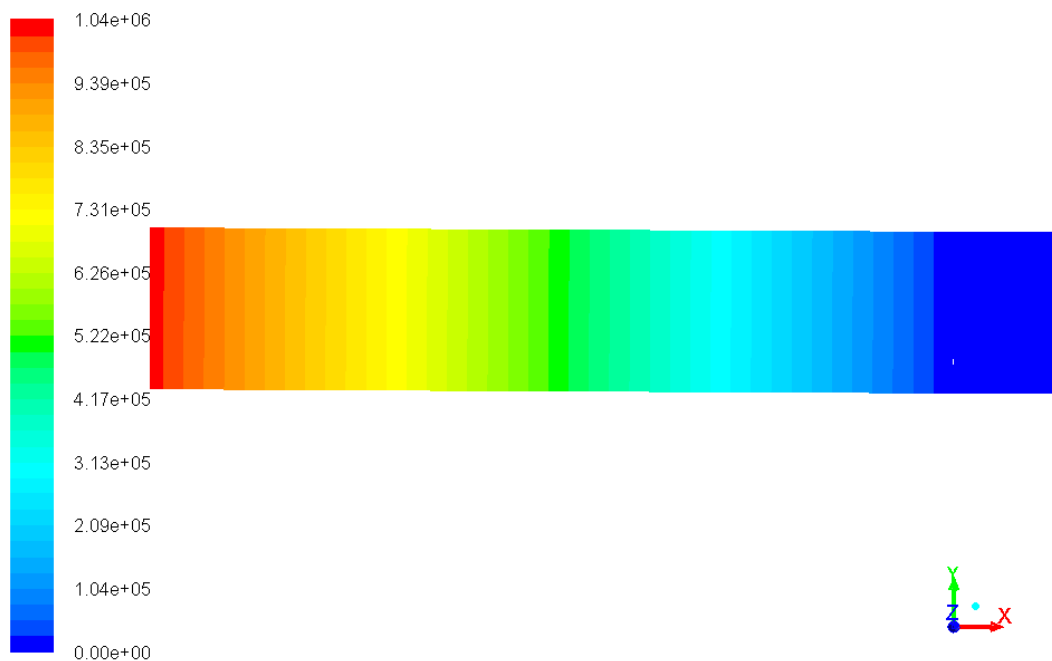
Obrázek 14 - Vektory rychlosti na vstupu porézní zóny

Na obr. 15 byl zobrazen průběh statického tlaku po délce trubice. Z obrázku je patrný lineární pokles tlaku v porézni zóně.



Obrázek 15 - Průběh poklesu tlaku v oblasti porézni zóny

Popsaný lineární pokles byl zobrazen konturami tlaku na obr. 16.



Obrázek 16 - Kontury tlaku v porézni zóně

4.4 Srovnání výsledků analytického a numerického řešení

Srovnání výsledků řešení bylo zobrazeno v tab. 4. Jako základ bylo uvažováno řešení analytického výpočtu.

Tabulka 4 - Srovnání výsledků řešení

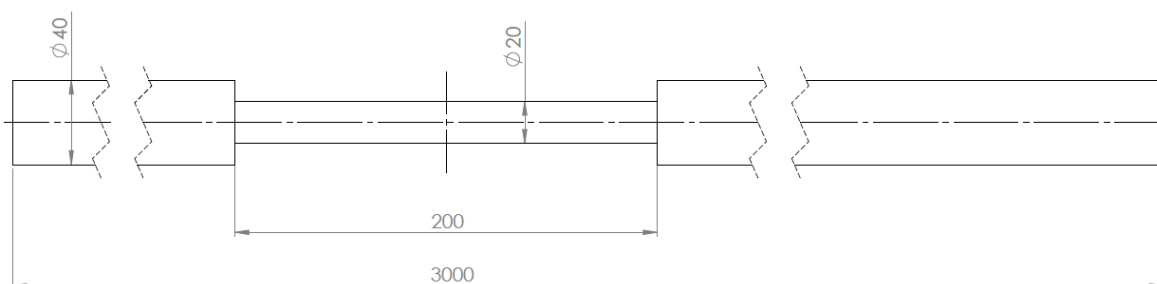
Řešení	Tlaková ztráta [Pa]	Odchylka
Analytický výpočet	998 201,5	-
Výpočet pro síť 1	1 037 937,1	3,9 [%]
Výpočet pro síť 2	1 043 126,4	4,3 [%]

Maximální odchylka dosažených výsledků tlakové ztráty byla stanovena jako 4,3%, což představuje 44 924,9 [Pa]. Tato rozdílnost je dána principem numerické simulace, jak bylo popsáno v teoretické části práce. Lze předpokládat, že je odchylka výsledků zanedbatelná.

5 Řešení úlohy tlakové ztráty vyvolané změnou průřezu

5.1 Definice úlohy

Druhá úloha je model náhlého zúžení a rozšíření v trubici dle schématu na obr. 17. Úloha jako taková pravděpodobně nenajde praktické uplatnění, představuje příklad jednoduché místní tlakové ztráty. Na praktické úlohy např. kohouty, kolena atd. jak je popsáno v teoretické části by bylo možné aplikovat obdobný postup.



Obrázek 17 - Schéma úlohy 2

Pro výpočet tlakové ztráty je určující proudící médium, geometrie úlohy a vstupní rychlost. Parametry úlohy byly zaznamenány v tab. 5.

Tabulka 5 - Parametry úlohy 2

Veličina	Označení	Jednotka	Hodnota
Proudící médium		-	Voda
Teplota		[°C]	20
Hustota		[kg.m ⁻³]	998,2
Dynamická viskozita		[Pa.s]	1,002.10 ⁻³
Kinematická viskozita		10 ⁻⁶ [m ² s ⁻¹]	1,003
Průměr trubice	D_1	[m]	0,04
Průměr zúžení	D_2	[m]	0,02
Délka zúžení	L_P	[m]	0,2
Volná délka	L_V	[m]	1,4

Vstupní rychlost	w_1	[m.s ⁻¹]	10
Tlak atmosféry	p_{atm}	[Pa]	101 325

5.2 Teoretický výpočet

Výpočet tlakové ztráty daného potrubí byl proveden jako součet místních a třecích tlakových ztrát. Byly vypočítány místní tlakové ztráty náhlým zúžením a náhlým rozšířením proudu. Dále pak třecí tlakové ztráty v celé délce potrubí.

Podle rovnice kontinuity pro nestlačitelné proudění, reflektující změnu průřezu (5.1) byla vypočtena střední rychlost média v zúžené části w_2 .

$$w_1 \cdot S_1 = w_2 \cdot S_2 \quad (5.1)$$

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{S_1}{S_2} = 10 \cdot \frac{\frac{\pi \cdot 0,04^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,02^2}{4}} = 40 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.2)$$

Dle vztahu (1.8) byly vypočítány hodnoty Reynoldsových čísel v obou úsecích trubice.

$$Re_1 = \frac{w_1 D_1}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,04}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 398\,803 \text{ [-]} \quad (5.3)$$

$$Re_2 = \frac{w_2 D_2}{\nu} = \frac{40 \cdot 0,02}{1,003 \cdot 10^{-6}} = 797\,607 \text{ [-]} \quad (5.4)$$

Podle vztahu (1.17) byl vypočítán součinitel místní ztráty pro náhlé zúžení proudu a jemu příslušející tlaková ztráta.

$$\xi_1 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)^{0,75} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4}}{\frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}\right)^{0,75} = 0,403 \text{ [-]} \quad (5.5)$$

$$\Delta p_1 = \xi_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho w_2^2 = 0,403 \cdot \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot 40^2 = 321\,790 \text{ [Pa]} \quad (5.6)$$

Podle vztahu (1.19) byl vypočítán součinitel místní ztráty pro náhlé rozšíření proudu a jemu příslušející tlaková ztráta.

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 = \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4}}\right)^{0,75} = 9 [-] \quad (5.7)$$

$$\Delta p_2 = \xi_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho w_1^2 = 0,403 \cdot \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot 10^2 = 449 190 [Pa] \quad (5.8)$$

Pro výpočet třecích ztrát v potrubí bylo nutné vypočítat součinitel třecích ztrát, ten je funkcí Reynoldsova čísla a je tedy různý v částech potrubí. Proudění bylo specifikováno jako turbulentní, proto byl součinitel stanoven pomocí vztahu (1.15).

$$\lambda_1 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_1}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{398 803}} = 0,013 \quad (5.9)$$

$$\lambda_2 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_2}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{797 607}} = 0,011 \quad (5.10)$$

Podle vztahu (1.13) byla určena třecí tlaková ztráta ve volném úseku potrubí o délce L_V a průměru D_1 .

$$\Delta p_3 = \lambda_1 \cdot \frac{L_V}{D_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho w_1^2 = 0,013 \cdot \frac{1,4}{0,04} \cdot \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot 10^2 = 22 709,1 [Pa] \quad (5.11)$$

Obdobě byla určena třecí tlaková ztráta v zúženém úseku potrubí o délce L_P průměru D_2 .

$$\Delta p_4 = \lambda_2 \cdot \frac{L_P}{D_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho w_2^2 = 0,011 \cdot \frac{0,2}{0,02} \cdot \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot 40^2 = 87 841,6 [Pa] \quad (5.12)$$

Celková tlaková ztráta byla vypočtena jako součet dílčích tlakových ztrát.

$$\begin{aligned}\Delta p &= \Delta p_1 + \Delta p_2 + 2 \cdot \Delta p_3 + \Delta p_4 & (5.13) \\ &= 321\,790 + 449\,190 + 2 \cdot 22\,709 + 87\,841,6 \\ &= \mathbf{904\,239,7 [Pa]}\end{aligned}$$

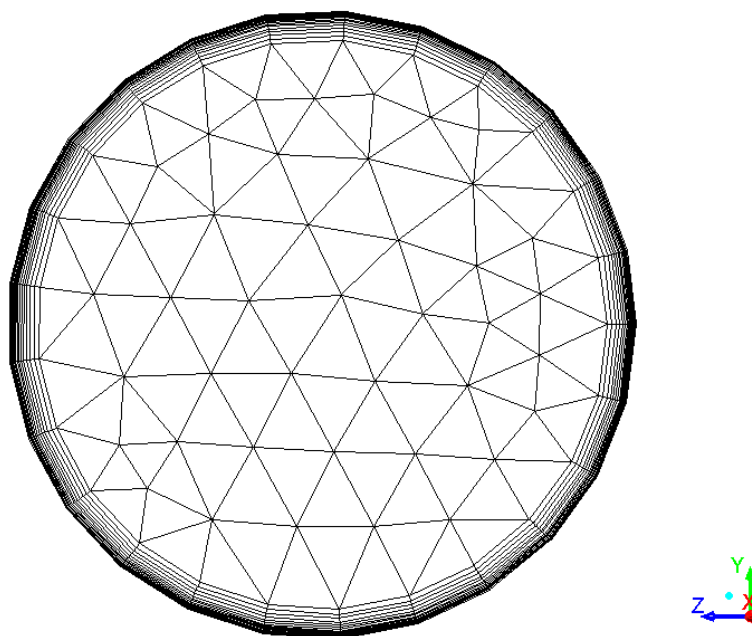
5.3 Numerický výpočet

V programu ANSYS Design Modeler byla namodelována geometrie dle schématu. Pro vytvoření sítě byl použit program ANSYS Meshing. Byly navrženy dvě sítě, jejichž parametry nastavení byly zaznamenány do tabulky 6.

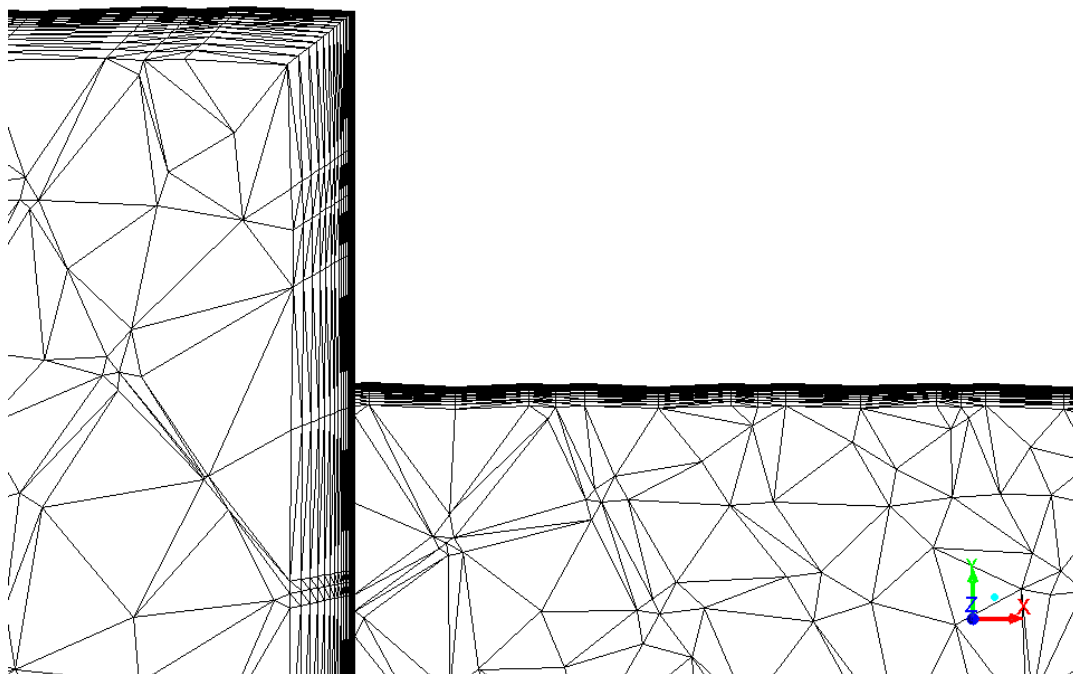
Tabulka 6 - Parametry sítí

Parametr sítě	Sít' 1	Sít' 2
Elementy	Tetra dominantní	Hexahedrální
Maximální velikost buňky	5 mm	2 mm
Tloušťka první vrstvy (FLT)	0,005 mm	0,005 mm
Počet vrstev zhuštění	30	30
Růst zhuštění	1,2	1,2
y+	0,05	0,08
Počet elementů	997 806	3 120 300

Na obr. 18 byla zobrazena první, tetra dominantní, výpočtová síť v příčném řezu. Na obr. 19 byla zobrazena síť v řezu podélném.

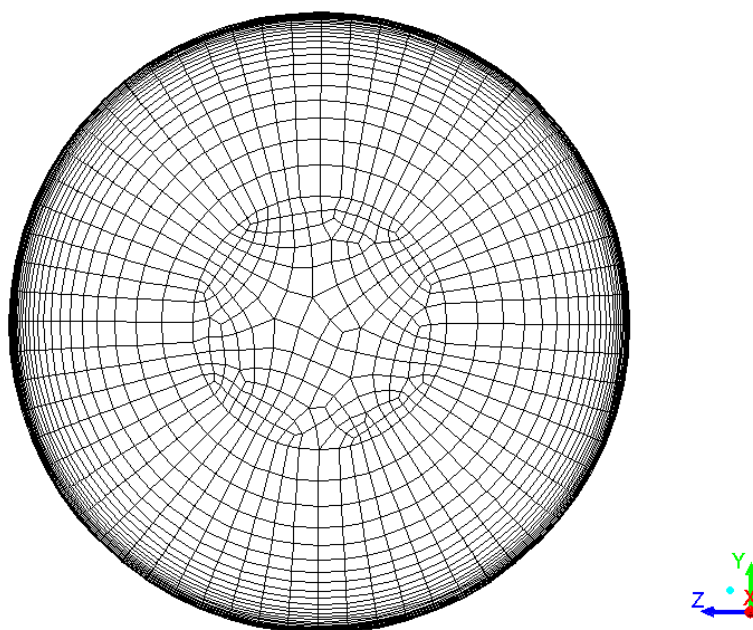


Obrázek 18 - Síť 1 v příčném řezu

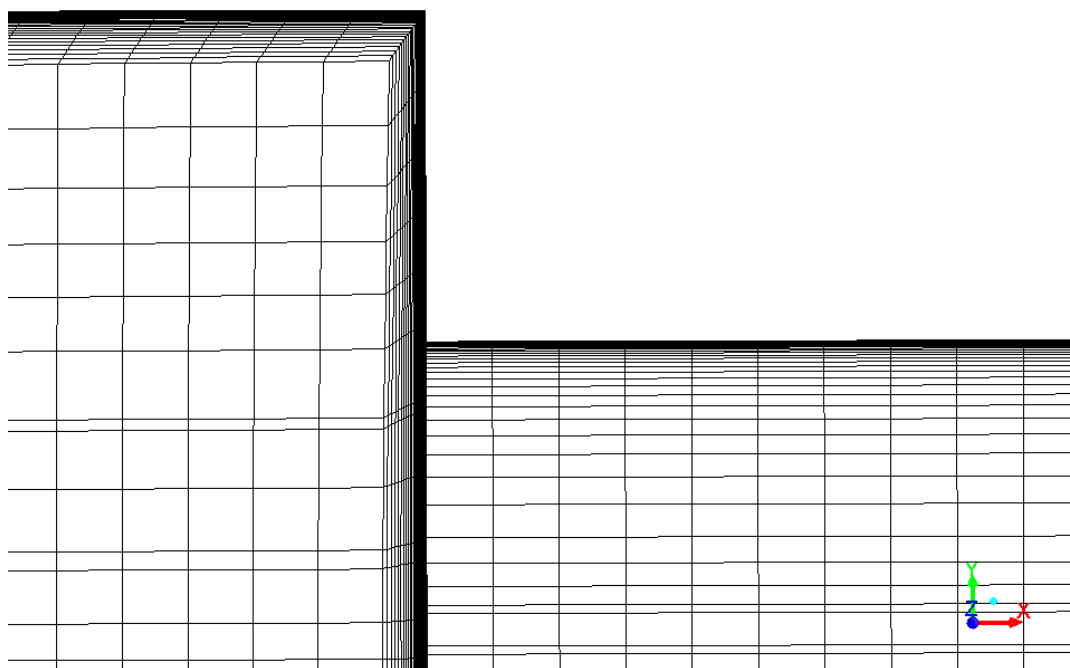


Obrázek 19 - Síť 1 v podélném řezu

Na obr. 20 byla zobrazena druhá, hexahedrální, výpočtová síť v příčném řezu. Na obr. 21 byla zobrazena síť v řezu podélném.



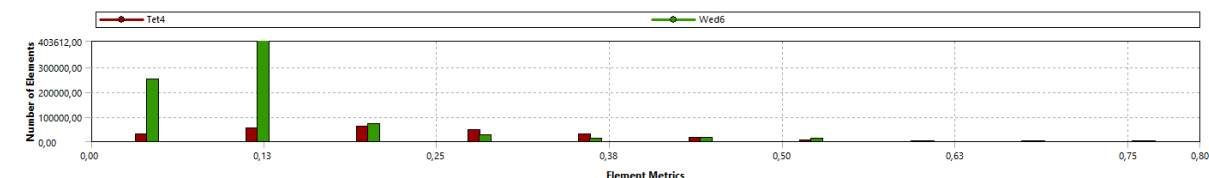
Obrázek 20 - Síť 2 v příčném řezu



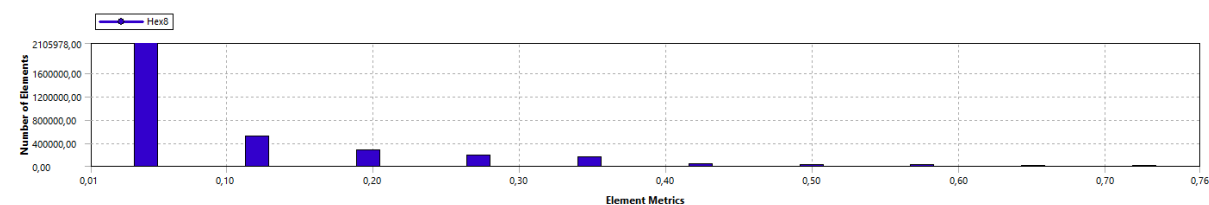
Obrázek 21 - Síť 2 v podélném řezu

Kvalita sítě

Na obr. 22 a 23 je zobrazeno kvalitativní zhodnocení obou výpočtových sítí pomocí skewness. U obou výpočetních sítí byla modelována mezní vrstva u stěn. Kvalita použitých sítí byla hodnocena jako dostatečná. Výpočetní čas při paralelním chodu 4 procesů byl řádově 35 minut.



Obrázek 22 - Skewness sítě 1



Obrázek 23 - Skewness sítě 2

Použité nastavení a výsledky

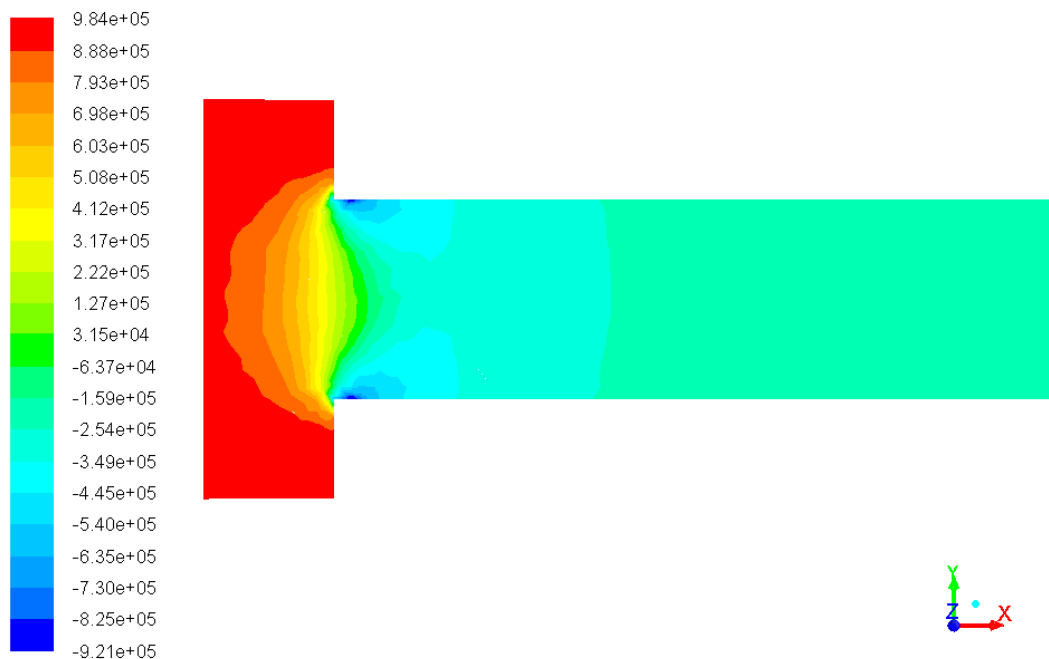
Pro výpočty byl použit dvourovňový turbulentní model $k - \omega SST$. Výsledky tlakové ztráty byly zapsány do tabulky 7.

Tabulka 7 - Výsledky výpočtů

Výpočet pro síť 1	945 521,0 [Pa]
Výpočet pro síť 2	911 613,8 [Pa]

Grafické výsledky numerického modelování

Na obr. 24 byly zobrazeny kontury statického tlaku na vstupu tekutiny do zúženého místa. Je zde patrný náhlý pokles tlaku, což odpovídá charakteru místní tlakové ztráty. Třecí tlakové ztráty nejsou patrné, byly by znatelné při vyšší škále kontur. Na obr. 25 byly pak zobrazeny kontury na výstupu ze zúžení, je zde opět patrný lokální pokles.

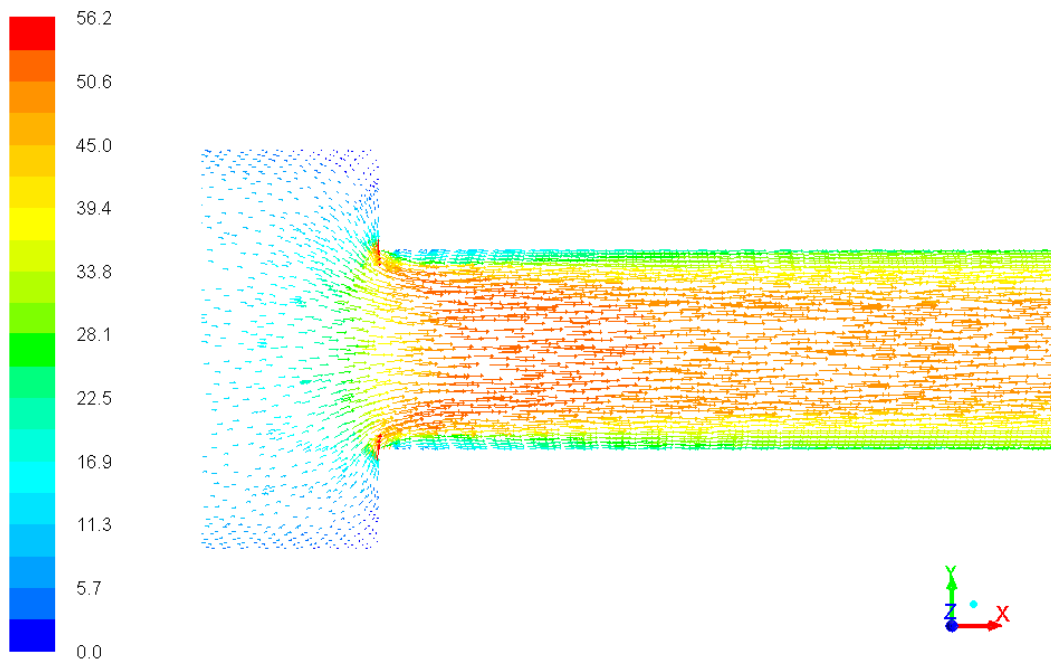


Obrázek 24 - Kontury tlaku na vstupu do zúžení

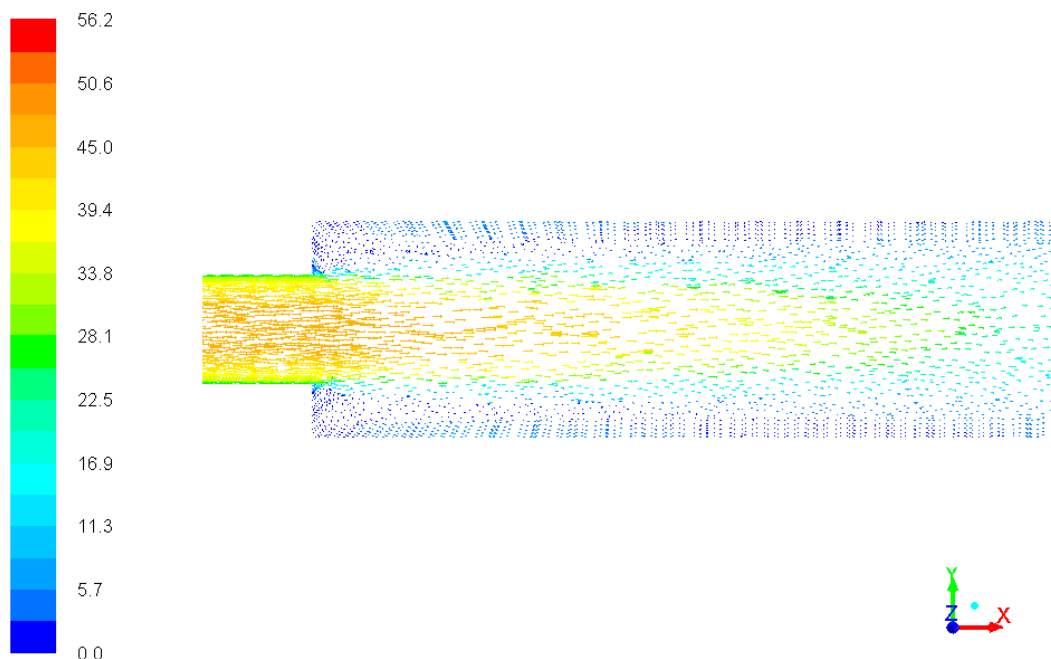


Obrázek 25 - Kontury tlaku na výstupu ze zúžení

Na obr. 26 byly zobrazeny vektory rychlosti tekutiny na vstupu do zúžení. Je patrný nárůst rychlosti, který je reflektován výpočtem střední rychlosti z rovnice kontinuity. Na obr. 27 byly pak vykresleny vektory na výstupu, je opět patrný pokles rychlosti.

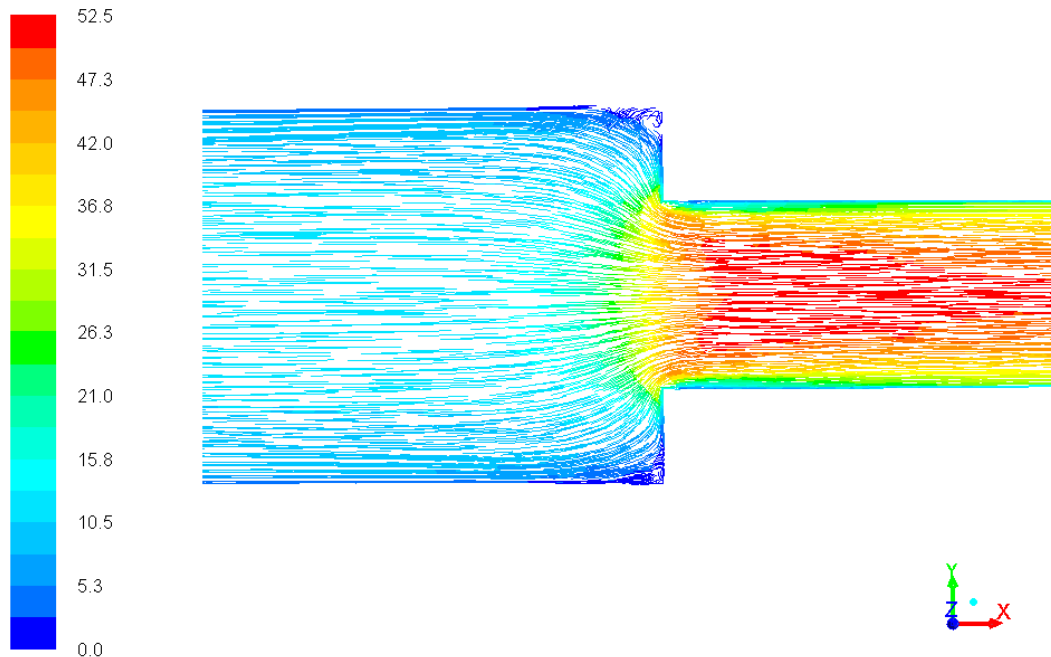


Obrázek 26 - Vektory rychlosti na vstupu do zúžení

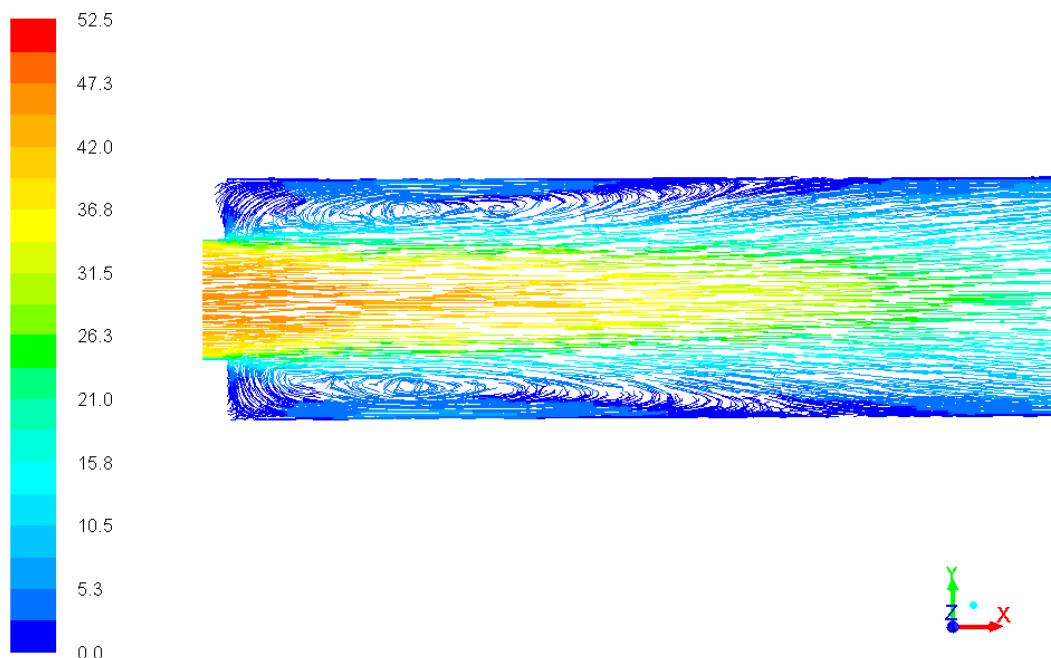


Obrázek 27 - Vektory rychlosti na výstupu ze zúžení

Na obr. 28 byly zobrazeny proudnice tekutiny na vstupu do zúžení. Na obr. 29 pak byly zobrazeny proudnice na výstupu ze zúžení. Proudnice byly obarveny dle rychlosti. Tyto obrázky dávají velice dobrou představu o proudění, obr. 29 se shoduje s teoretickým obr. 2.

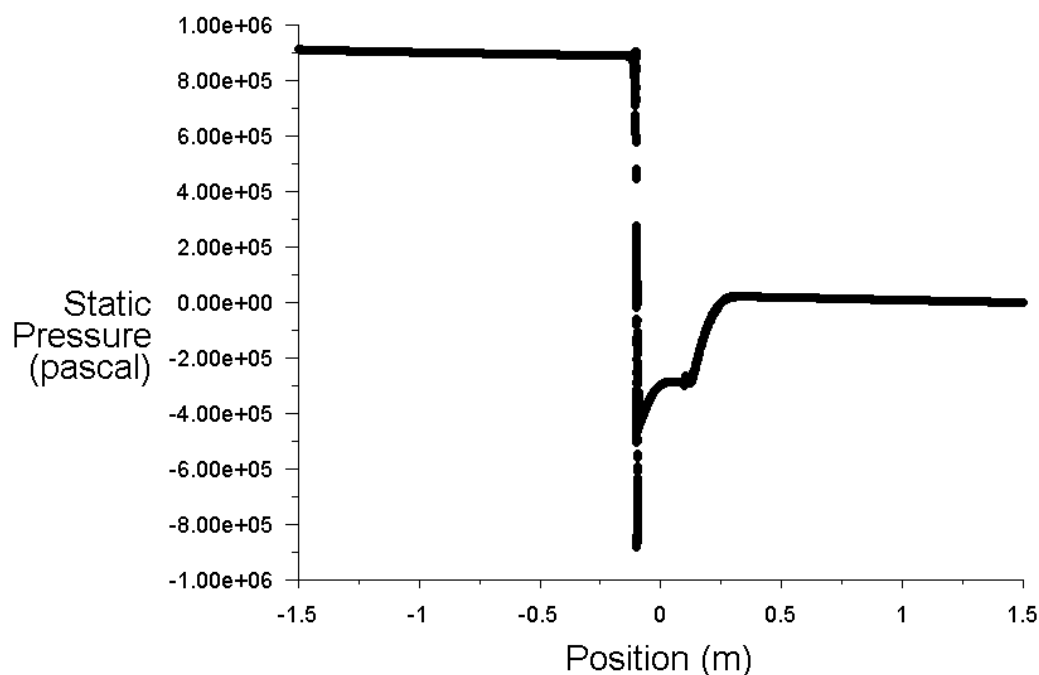


Obrázek 28 - Proudnice na vstupu do zúžení



Obrázek 29 - Proudnice na výstupu ze zúžení

Na obr. 30 byl zobrazen průběh statického tlaku po délce trubice. Z obrázku jsou patrné skokové změny tlaku v místech náhlé změny průřezu kanálu. Dále je patrný lineární pokles ve volných úsecích, to je způsobeno třecími ztrátami.



Obrázek 30 - Průběh tlaku po délce trubice

5.4 Srovnání výsledků analytického a numerického řešení

Srovnání výsledů řešení bylo zobrazeno v tab. 8. Jako základ bylo uvažováno řešení analytického výpočtu.

Tabulka 8 - Srovnání výsledů řešení

Řešení	Tlaková ztráta [Pa]	Odchylka
Analytický výpočet	904 239,7	-
Výpočet pro síť 1	945 521,0	4,3 %
Výpočet pro síť 2	911 613,8	0,8 %

Maximální odchylka dosažených výsledků tlakové ztráty byla stanovena jako 4,3 %, což představuje 41 281,3 [Pa]. Jako správnější hodnotu tlakové ztráty je vhodné uvažovat výsledek analytického řešení, protože představuje výsledek experimentů. Odchylka výsledků je dána pravděpodobně principem numerické simulace. V praktické úloze lze pravděpodobně předpokládat, že je odchylka výsledků zanedbatelná.

Závěr

Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou část. Cílem teoretické části bylo popsat výpočet tlakových ztrát při proudění kapalného média potrubím. Byly uvedeny základní vztahy a předpoklady pro výpočet tlakových ztrát s důrazem na použití v praktické části. Dalším cílem bylo provedení rešerše modelování porézních materiálů v CFD systému ANSYS FLUENT. Byly shrnuty základní předpoklady použití porézních materiálů v CFD modelování a byly uvedeny rovnice, implementované v ANSYS FLUENT aplikované na porézní zóny, pro vytvoření představy o základních principech. Dále byly popsány základní principy CFD modelování a hodnocení kvality výpočetních sítí.

Byly navrženy 2 jednoduché úlohy tlakových ztrát. Konkrétně tlaková ztráta v přímé trubici vyvolaná v prvním případě vloženou porézní zónou, v druhém případě zúžením. Tyto úlohy byly vyřešeny analyticky a zároveň numericky. U obou způsobů řešení byly aplikovány poznatky teoretické části. Numerické modelování bylo provedeno vždy pro dvě výpočetní sítě tetra dominantní a hexahedrální pomocí dvourovnicového turbulentního modelu.

Analytický výpočet vycházel ze vztahů vzniklých na základě zobecnění mnoha experimentů, je proto vhodné považovat tyto výsledky za přesnější. Maximální odchylka dosažených výsledků u obou úloh nepřekročila 4,3%. Odchylky numerického řešení byly způsobeny pravděpodobně kvalitou sítě, bylo by možné jejich další vylepšení. Provedením obou výpočtů byly s danou přesností ověřeny výsledky v úlohách místních tlakových ztrát.

Rozvojem výpočetní techniky nacházejí CFD programy stále širší uplatnění. Porovnáním výsledků úloh bylo prokázáno, že se výsledky numerického a analytického výpočtu výrazně neliší. Pro CFD modelování je však potřeba, aby byl řešitel schopen navrhnout správnou výpočetní síť a rozhodl o použití aplikovaného modelu. Toto řešení i výsledky jsou tedy značně závislé na zkušenostech. Naproti tomu je analytický přístup velice snadný, spočívá v základním přehledu o problematice a řešení triviální matematické úlohy. Je tedy vhodné zabývat se i dnes analytickými metodami ačkoli v praktických výpočtech jsou značně omezeny náročností.

Řešení práce bylo prováděno ve spolupráci s firmou Škoda JS a.s., kde budou závěry práce sloužit jako obhájení standardně využívaných postupů řešení. Poznatky práce naleznou uplatnění jako rešerše možností modelování porézních materiálů v CFD systému ANSYS FLUENT. Umožní tedy orientaci v možnostech nastavení programu při modelování těchto materiálů. Rozměry úloh byly voleny tak, aby dosažené výsledky bylo možné porovnat s přímými experimenty proveditelné na PIV zařízení nacházejícího se v laboratořích Katedry energetických strojů a zařízení. Experimentální ověření dosažených výsledků je tedy další potenciální využití práce. Dalším využitím práce je pak poskytnutí srovnání analytických a numerických metod řešení konkrétních úloh, může tedy sloužit i jako podklad pro rozhodnutí o variantě řešení.

Seznam použitých zdrojů

1. IDEL'ČIK, I. J. et al. *Handbook of hydraulic resistance /Spravočník po gidravličeskim soprotivlenijam*. Ahmedabad: Jaico Publishing House, 2008. ISBN 81-7992-118-2.
2. ANSYS, I. ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 15.0. In: *ANSYS Fluent Theory Guide* [online]. 2013 [cit. 2016-Leden-05]. Dostupné z: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf>
3. ANSYS, I. ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 15.0. In: *ANSYS Fluent User's Guide* [online]. 2013 [cit. 2016-Leden-05]. Dostupné z: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>
4. LINHART, J. *Mechanika Tekutin I. 2. vydání*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-766-7.
5. MAREŠ, R. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-706-3.
6. Encyklopedie.amapro.cz. *AmaPro* [online]. 2016 [cit. 2016-Březen-16]. Dostupné z: <http://amapro.cz/encyklopedie/skola/darcyho%20zakon.php>
7. MOŠOVÁ, V. *Numerické metody*. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, 2003. ISBN: 8024406209.
8. Ústav chemického inženýrství. In: *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. [cit. 2016-Březen-25]. Dostupné z: https://vscht.cz/uchi/ped/cfd/cfd.metoda_konecných_objemu.pdf
9. KOZUBKOVÁ, . *Modelování proudění tekutin*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008.
10. The Engineering Toolbox. *www.engineeringtoolbox.com* [online]. [cit. 2016-Březen-20]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html
11. Screen servis spol. s r.o. In: *Screen servis* [online]. 2016 [cit. 2016-Březen-16]. Dostupné z: <http://www.screenservis.cz/cs/root/prumyslova-sita/kovova-sita/dratena/dratene-sito-se-ctvercovymi-nebo-obdelnikovymi-oky-z-predkrepovaneho-dratu>
12. ŽIROVNICKÁ, J. ZONO Profí náradí. In: *ZONO* [online]. 2016 [cit. 2016-Březen-16]. Dostupné z: <http://www.zono.cz/bosch-hlavni-textilni-filtracni-jednotka-pro-aku-vysavac-pas-18-li/d-72334/>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Závislost velikosti součinitele třecích ztrát na velikosti Reynoldsova čísla [4]..	18
Obrázek 2 - Ztráta náhlým rozšířením proudu [4]	19
Obrázek 3 - Schéma výpočetní sítě metody konečných objemů [8]	23
Obrázek 4 - Tvar konečného objemu [9]	25
Obrázek 5 - Princip posuzování kvality 2D a 3D buňky [9]	26
Obrázek 6 - Schéma úlohy 1	37
Obrázek 7 - Sít' 1 v příčném řezu	39
Obrázek 8 - Sít' 1 v podélném řezu	39
Obrázek 9 - Sít' 2 v příčném řezu	40
Obrázek 10 - Sít' 1 v podélném řezu	40
Obrázek 11 - Hodnocení kvality sítě 1 pomocí skewness.....	41
Obrázek 12 - Hodnocení kvality sítě 2 pomocí skewness.....	41
Obrázek 13 - Kontury rychlosti na vstupu porézní zóny	42
Obrázek 14 - Vektory rychlosti na vstupu porézní zóny.....	42
Obrázek 15 - Průběh poklesu tlaku v oblasti porézní zóny.....	43
Obrázek 16 - Kontury tlaku v porézní zóně	43
Obrázek 17 - Schéma úlohy 2	45
Obrázek 18 - Sít' 1 v příčném řezu	49
Obrázek 19 - Sít' 1 v podélném řezu	49
Obrázek 20 - Sít' 2 v příčném řezu	50
Obrázek 21 - Sít' 2 v podélném řezu	50
Obrázek 22 - Skewness sítě 1	51
Obrázek 23 - Skewness sítě 2.....	51
Obrázek 24 - Kontury tlaku na vstupu do zúžení.....	52
Obrázek 25 - Kontury tlaku na výstupu ze zúžení	52
Obrázek 26 - Vektory rychlosti na vstupu do zúžení	53
Obrázek 27 - Vektory rychlosti na výstupu ze zúžení.....	53
Obrázek 28 - Proudnice na vstupu do zúžení	54
Obrázek 29 - Proudnice na výstupu ze zúžení	54
Obrázek 30 - Průběh tlaku po délce trubice	55

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry úlohy 1	37
Tabulka 2 - Parametry navržených sítí.....	38
Tabulka 3 - Výsledky výpočtů	41
Tabulka 4 - Srovnání výsledů řešení	44
Tabulka 5 - Parametry úlohy 2	45
Tabulka 6 - Parametry sítí	48
Tabulka 7 - Výsledky výpočtů	51
Tabulka 8 - Srovnání výsledů řešení	55