

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Matematické modelování proudění v kulovém ventilu.

Mathematical modeling of flow in the ball valve.

Student:

Bc. Jiří Rak

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2014

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne.....*15.5.2014*.....



.....
Rak Jiří

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Rak**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Matematické modelování proudění v kulovém ventilu**
Mathematical Modeling of Flow in the Ball Valve

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše k problematice kulových ventilů, charakteristiky, měření charakteristik a vícerozměrné proudění skutečných kapalin.
2. Vytvoření 3D modelů kulového ventilu v různých polohách uzavření, vyhodnocení průtočné plochy ventilem, definování matematického modelu proudění vody ventilem, definování vstupních okrajových podmínek.
3. Matematické modelování proudění vody ve ventilu v různých polohách uzavření. Vyhodnocení charakteristiky ventilu. Porovnání charakteristiky ventilu s experimentálním měřením.
4. Stanovení průtokového součinitele ventilu pro různé polohy z numerické simulace. Porovnání průtokového součinitele se součinitelem vyhodnoceným na základě experimentálního měření.
5. Vyhodnocení proudového pole skrz kulový ventil (rychlostní, tlakové pole, atd.). Zhodnocení jednotlivých variant.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění FLUENT, CFX*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.
2. BOJKO, M. *3D proudění – Ansys Fluent učební text*, VŠB-TU Ostrava, 2012. 314 s. ISBN 978-80-248-2607-3. <<http://www.338.vsb.cz/PDF/3D-Bojko.pdf>>.
3. KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*, VŠB-TU Ostrava, 2011, 174 s., ISBN 978-80-248-2491-8.
<http://www.338.vsb.cz/PDF/Modelovani_prenosu_tepla_hmoty_a_hybnosti-KOZUBKOVA.pdf>
4. FLUENT: *Fluent 14.0 - ANSYS FLUENT*, ANSYS, Inc. 2011.
5. ZHANG, S. C., ZHANG, Y. L., FANG, Z. M. *Numerical simulation and analysis of ball valve three-dimensional flow based on CFD*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, Vol. 15, Part 5.
6. GRINIS, L., HASLAVSKY, V. *Turbulence Modeling Applied to Flow over a Hydraulic Ball Check Valve*. Engineering, 2013, Vol. 5, p. 685-691.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Poděkování

Za cenné rady a vstřícnost poskytnuté při zpracování této diplomové práce děkuji vedoucímu Ing. Mariánu Bojkovi Ph.D a oponentce doc. RNDr. Miladě Kozubkové CSc. Kolektivu pracovníků Institutu hydromechaniky a hydraulických zařízení děkuji za vstřícnost a vytvoření výborných pracovních podmínek.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická Univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě, dne 11. května 2014

Jiří Rak

Adresa: Raškovice 375
739 04 Pražmo



ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

RAK, Jiří. *Matematické modelování proudění v kulovém ventilu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Hydromechaniky a Hydraulických Zařízení, 2014, 75 s. Vedoucí práce: Ing. Marián Bojko, Ph.D.

Zaměření diplomové práce je na matematické modelování proudění v kulovém ventilu v prostředí programu ANSYS Fluent a následné porovnání hodnot s naměřenými na experimentálním zařízení. Úvodní část práce je zaměřena na kulové ventily, jednotlivé typy a jejich problematiku. Dále je popsáno měření charakteristiky kulového ventilu s definicí jednotlivých měřidel tlaku a průtoku použitých pro experiment. Druhá část práce se zabývá problematikou matematického modelování proudění skutečných kapalin za použití metody konečných objemů. V další části práce je popsána tvorba geometrie kulového ventilu, přenos geometrie do prostředí ANSYS Design Modeler, vytvoření výpočetní sítě a definování okrajových podmínek. Předposlední část diplomové práce obsahuje vyhodnocení pomocí tabulek a grafů. Závěrečná část se věnuje porovnání vypočtených hodnot z experimentu a matematického modelování.

ANOTATION OF DIPLOMA THESIS

RAK, Jiří. *Mathematical modeling of flow in the ball valve: diploma thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Systems, 2014, 75 p. Thesis Head: Ing. Marián Bojko, Ph.D.

The diploma thesis focuses on mathematical modelling of flow in the ball valve in ANSYS Fluent software. This is followed by a comparison of the values measured with the help of experimental device. First, the issue of the ball valves and its different types is introduced. Secondly, thesis describes the measurement of quality of the ball valve through a definition of the individual pressure gauges and the flow used for the experiment. Following that thesis deals with mathematical modelling of real flow of fluids using a finite volume method. Next section designates geometry of the ball valve, geometry transmission to ANSYS Design Modeler, creation of mesh and illustration of boundary conditions. Last but one part evaluates the research using tables and graphs. The final part is devoted to a comparison of calculated values retrieved within experiments and mathematical modelling.

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. ÚVOD | 10 |
| 2. KULOVÉ VENTILY | 11 |
| 2.1 Druhy kulových ventilů | 12 |
| 2.1.1 Kulový ventil s plovoucí koulí | 12 |
| 2.1.2 Kulový kohout s plovoucím sedlem | 13 |
| 2.2 Použití kulových ventilů v praxi | 14 |
| 3. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY KULOVÉHO VENTILU | 15 |
| 3.1 Měřidla tlaku | 15 |
| 3.1.1 Hydrostatické tlakoměry | 16 |
| 3.1.2 Deformační tlakoměry | 17 |
| 3.1.3 Pístové tlakoměry | 17 |
| 3.1.4 Elektrické převodníky tlaku | 18 |
| 3.2 Měřidla průtoku | 19 |
| 3.2.1 Měření průtoku clonou | 19 |
| 3.2.2 Měření průtoku Venturiho trubicí | 19 |
| 3.2.3 Měření průtoku dýzou | 20 |
| 3.3 Měření $\Delta p - Q$ charakteristiky kulového ventilu na vodní trati | 20 |
| 4. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ SKUTEČNÝCH KAPALIN | 22 |
| 4.1 Metoda konečných objemů (MKO) | 23 |
| 4.2 Popis definovaného matematického modelu proudění skutečné kapaliny | 24 |
| 4.2.1 Dvourovnicový matematický model $k - \varepsilon$ | 25 |
| 4.2.2 Dvourovnicový matematický model $k - \omega$ | 26 |
| 5. APLIKACE DEFINOVANÉHO MATEMATICKÉHO MODELU A NUMERICKÝ VÝPOČET | 27 |
| 5.1 Tvorba geometrie kulového ventilu | 27 |
| 5.2 Tvorba výpočetní sítě | 29 |
| 5.3 Nastavení numerického výpočtu v prostředí ANSYS Fluent | 33 |
| 6. VÝPOČETNÍ PŘÍSTUPY, VYHODNOCENÍ ODPOROVÉHO A PRŮTOKOVÉHO SOUČINITELE A PRŮTOČNÉ PLOCHY | 34 |
| 6.1 Varianty výpočtu průtokového součinitele | 34 |
| 6.1.1 Varianta I | 34 |
| 6.1.2 Varianta II | 34 |
| 6.2 Výpočet průtokového součinitele a průtočné plochy | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.2.1 | Varianta I - postup výpočtu průtokového součinitele..... | 34 |
| 6.2.2 | Varianta II - postup výpočtu průtokového součinitele..... | 36 |
| 6.2.3 | Postup při výpočtu průtočné plochy | 36 |
| 7. | VÝPOČET A VYHODNOCENÍ HODNOT Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ..... | 37 |
| 7.1 | Výpočet a vyhodnocení naměřených hodnot | 37 |
| 7.1.1 | Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z naměřených hodnot dle výpočtu varianty I. | 39 |
| 7.1.2 | Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z naměřených hodnot dle výpočtu varianty II. | 40 |
| 7.2 | Výpočet a vyhodnocení výsledků z matematického modelování | 41 |
| 7.2.1 | Grafické zpracování výsledků z matematického modelování pro 20° a 60° otevření ventilu | 41 |
| 7.2.2 | Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z výsledků matematického modelování dle výpočtu varianty I. | 46 |
| 7.2.3 | Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z výsledků matematického modelování dle výpočtu varianty II..... | 47 |
| 7.3 | Porovnání průtokových součinitelů a průtočných ploch z naměřených hodnot a výsledků matematického modelování..... | 48 |
| 8. | GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ PROUDOVÝCH VELIČIN Z NUMERICKÉ SIMULACE | 49 |
| 9. | ZÁVĚR | 57 |
| 10. | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ODKAZŮ | 59 |
| 11. | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 61 |
| 12. | SEZNAM TABULEK | 63 |
| 13. | SEZNAM PŘÍLOH..... | 64 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

| | | |
|--------------------|---------------------------|------------------------------------|
| G_p | tíha pístu | [N] |
| G_z | tíha závaží | [N] |
| K | konstanta | [-] |
| Q | průtok | [m ³ .s ⁻¹] |
| Q_m | hmotnostní průtok | [kg.s ⁻¹] |
| Q_v | objemový průtok | [m ³ .s ⁻¹] |
| S | plocha | [m ²] |
| S_0 | maximální průtočná plocha | [m ²] |
| Δp | tlakový spád | [Pa] |
| $c_{1\varepsilon}$ | empirická konstanta | [-] |
| $c_{2\varepsilon}$ | empirická konstanta | [-] |
| c_D | konstanta | [-] |
| Δh_c | ztrátová výška clony | [m] |
| Δh_p | ztrátová výška prvku | [m] |
| g | tíhové zrychlení | [m.s ⁻²] |
| h | výška | [m] |
| k | turbulentní energie | [-] |
| p | tlak | [Pa] |
| p_1 | vstupní tlak | [Pa] |
| p_2 | výstupní tlak | [Pa] |
| T | teplota | [C°] |
| t | čas | [s] |
| u | rychlostní měřítko | [m.s ⁻¹] |
| v | rychlost proudění | [m.s ⁻¹] |
| ε | rychlost disipace | [m.s ⁻¹] |
| λ | součinitel třecích ztrát | [-] |
| μ | součinitel průtoku | [-] |
| ν_t | turbulentní viskozita | [m ² .s ⁻¹] |
| π | Ludolfovo číslo | [-] |
| ρ | hustota média | [kg.m ⁻³] |
| σ_k | empirická konstanta | [-] |
| ω | specifická disipace | [-] |
| ζ | součinitel místních ztrát | [-] |

1. ÚVOD

Při proudění média potrubím dochází v obvodu v jednotlivých tvarovkách, armaturách a potrubích k různým hydraulickým ztrátám. Tyto ztráty vznikají vlivem viskozity kapaliny, kdy jednotlivé částice třou o sebe a o stěny potrubí. Hlavním důsledkem vznikajících ztrát je nárůst celkového tlakového spádu obvodu a tím nutnosti volby jiného čerpadla s vyššími parametry výkonu. Tento důsledek se nesmí při návrzích a výpočtech obvodu zanedbávat, mohlo by dojít k tomu, že součet všech tlakových ztrát v obvodu bude větší, než tlak, který dodává čerpadlo, tím pádem by kapalina neprošla celým potrubím. Vedlejším nepříznivým důsledkem je přeměna ztrátové energie v teplo a tím zahřívání obvodu a média, které je spojeno s vyššími nároky na volbu chladiče.

Tyto vznikající hydraulické odpory jsou definovány různými ztrátovými součiniteli, které jsou specifické pro jednotlivé části obvodu.

- **součinitel místních ztrát ζ** - vzniká v oblastech, kde se mění směr proudění média (kolena, oblouky, rozbočení, kompenzační smyčky atd.).
- **součinitel třecích ztrát λ** - tento součinitel vzniká v potrubích vlivem tření média o jeho stěny.
- **součinitel průtoku μ** - součinitel vzniká v oblastech, kde dochází ke škrcení průtoku (hradící armatury, redukční ventily, kulové ventily atd.)

V dnešní době moderních výpočtových technologií je možné kromě fyzikálního přístupu tyto hydraulické odpory také simulovat za užití matematického přístupu v různých softwarech (ANSYS Fluent, Matlab, Maple, MathCAD atd.) a tím si zjednodušit práci při navrhování celého potrubního systému. Je ovšem důležité výsledky vyhodnocené z numerické simulace v konečné fázi porovnat s fyzikálním experimentem a to z důvodů verifikace modelování, které může být zatížené jistou výpočetní chybou vlivem zjednodušení matematického modelu oproti hydraulickému mechanismu.

Průnik matematického modelování do technického odvětví přinesl řadu výhod, díky kterým:

- můžeme zjistit veškeré informace o průběhu chování celého mechanismu
- můžeme urychlit chování systému, které může ve skutečnosti trvat dlouhodobě
- můžeme pozorovat průběh výpočtu a postupně vyhodnocovat a porovnávat jednotlivé veličiny

- můžeme provádět simulace dle různých předem nastavených matematických modelů a tím získat řadu možných výsledků

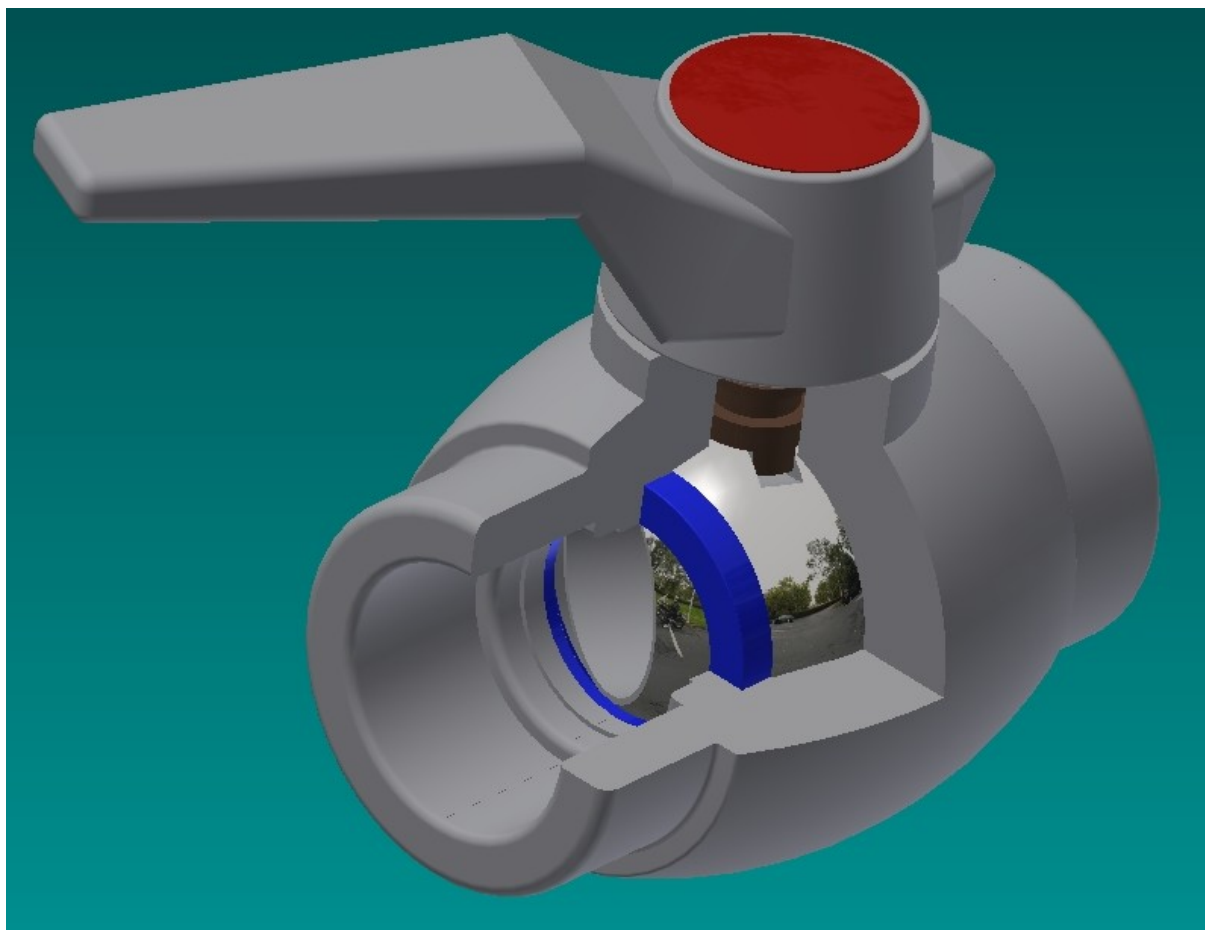
Předmětem této diplomové práce je vyhodnocení hydraulických odporů, které vznikají v kulovém ventilu pomocí matematického modelování proudění s následným porovnáním s naměřenými a vypočtenými hodnotami z praktického měření.

Matematické modelování proudění v kulovém ventilu obnášelo složitou přípravu výpočtové geometrie, protože pro účely práce nebyla dodána. Bylo zapotřebí kulový ventil rozříznout a všechny rozměry pohyblivých i pevných částí prakticky odměřit. Pro výpočtový software bylo potřeba vytvořit vnitřní část potrubí před a za prvkem a samotný kulový ventil pro čtyři varianty otevření (0° , 20° , 40° a 60°) viz obr. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5. Každou jednotlivou geometrii bylo potřeba vysítovat a poté síť adaptovat přímo v prostředí ANSYS Fluent, kde se dále nastavil typ matematického modelu a okrajové podmínky.

Získané hodnoty z matematické simulace a experimentu budou vyhodnoceny pomocí tabulek a grafů. V závěru práce budou konkrétně porovnány hodnoty vypočtených průtokových součinitelů a průtočných ploch.

2. KULOVÉ VENTILY

Jsou prvky v hydraulickém obvodu, které mají za úkol hradit průtok kapaliny potrubím pomocí rotace koule s otvorem, viz obr.2.1. V závislosti na jeho otevření se reguluje množství průtoku, ale nelze tyto ventily použít jako škrťací nebo regulační armatury. U tohoto ventilu vzniká při jeho plném otevření minimální tlakový spád. Rozsah použití tohoto ventilu závisí na druhu a teplotě protékajícího média. Jeho nejčastější použití najdeme v domácnostech a výrobních podnicích pro rozvod stlačeného vzduchu, plynu či vody v potrubních rozvodech, vyskytují se ovšem i v aplikacích, kdy je potřeba rozvádět topné plyny, koksárenské plyny případně horkou páru. V těchto případech je ale potřeba volit kulové ventily z jiného materiálu než z plastu z důvodů chemické agresivity proudícího média.



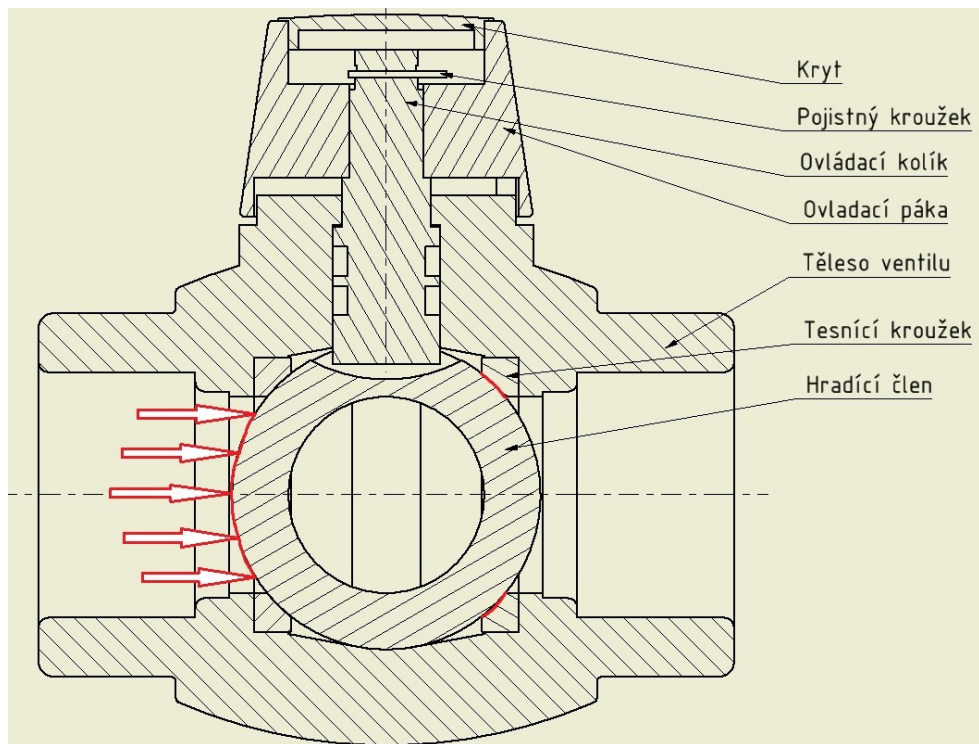
Obr. 2.1 Kulový ventil

2.1 Druhy kulových ventilů

Ventily se vyrábějí ve dvou základních konstrukcích (s plovoucí koulí a s plovoucím sedlem). Použití jednotlivých ventilů závisí na pracovních podmínkách (světlosti potrubí, pracovním tlaku, teplotě proudícího média případně druhu média). Ventily s plovoucí koulí pro běžná použití se vyrábí do světlosti DN 500 mm a pracovní tlak PN 160 bar. Ventil s plovoucím sedlem se vyrábějí pro nižší světlosti potrubí do DN 200 mm ale pro vyšší pracovní tlak až PN 250 bar [1].

2.1.1 Kulový ventil s plovoucí koulí

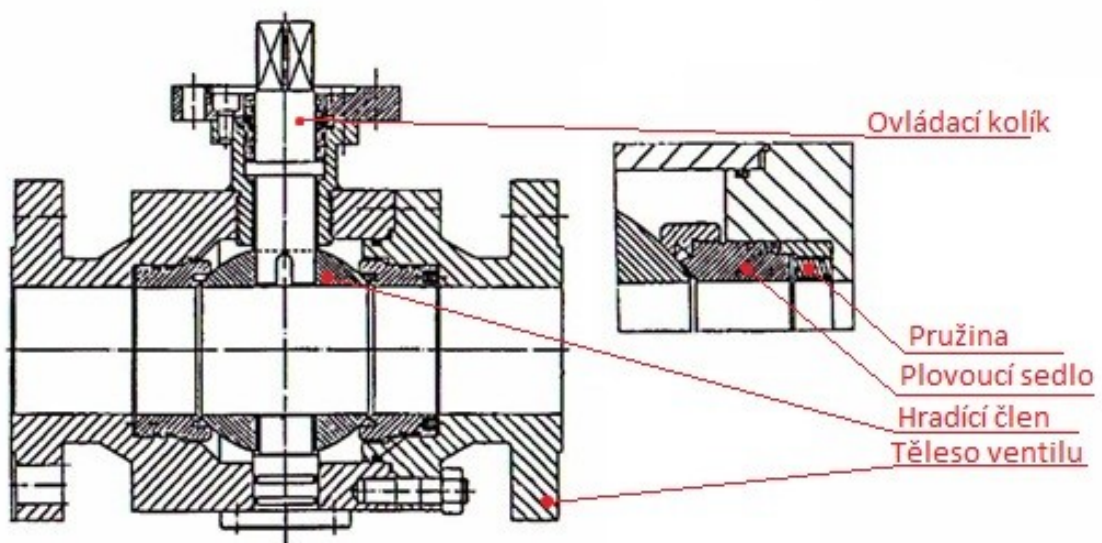
V tomto ventilu je koule uložena ve dvou těsnících kroužcích, tyto kroužky mají za úkol při plném uzavření zabránit průsaku média, viz obr . 2.2. Díky možnosti osového posunu koule ve směru průtoku dochází při plném uzavření pomocí působícího pracovního tlaku na plochu koule ze směru průtoku k dotlačení na protilehlé těsnění a tím zabránění možného průsaku. Možnost osového posunu je způsobena drážkou v kouli [1].



Obr. 2.2 Řez ventilem a působení pracovního tlaku na kouli

2.1.2 Kulový kohout s plovoucím sedlem

U tohoto druhu kulového ventilu je koule uložena na horním a spodním čepu a tím je umožněno její otáčení ovšem nikoli její axiální posuv, viz obr. 2.3. Těsnost sedla a tím ventilu při uzavření je zajištěna axiálním posuvem a dotlačením sedla na vstupní straně na kouli pomocí tlaku pracovního média. Na druhé výstupní straně je sedlo dotlačováno na kouli pomocí pružiny [1].



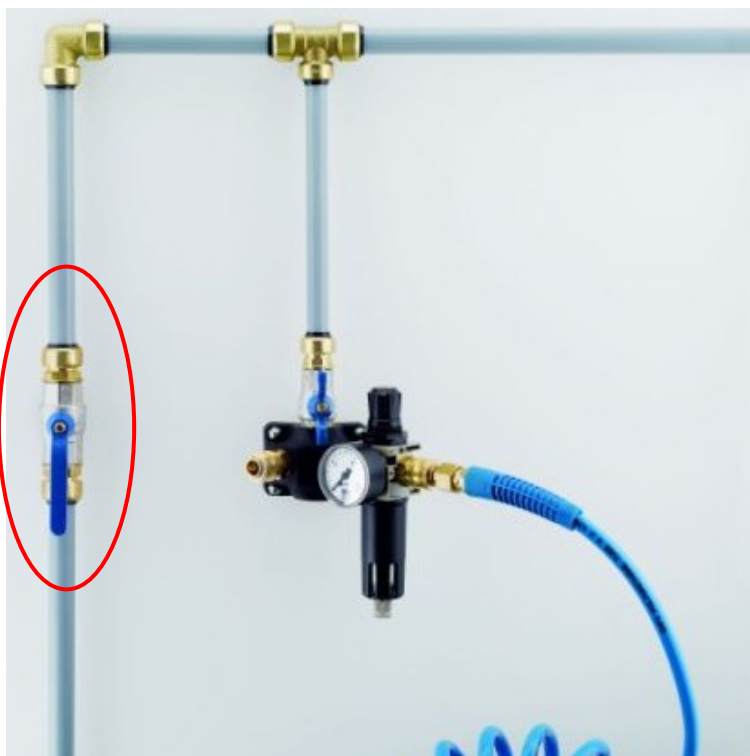
Obr. 2.3 Kulový ventil s plovoucím sedlem [1]

2.2 Použití kulových ventilů v praxi

Použití kulových ventilů v praxi je v dnešní době velice rozsáhlé. Nejčastější případy aplikace jsou v potrubích pro rozvody vody, stlačeného vzduchu a plyných látek ať už v domácnostech tak i ve výrobních halách. Uplatnění najdou kulové ventily také u ropvodů, rozvodů teplárenských plynů a potrubních rozvodů horké páry. Pro ukázkou je níže několik aplikací, viz obr. 2.4, 2.5, 2.6.



Obr. 2.4 Aplikace ventilu zahradního zavlažování [14]



Obr. 2.5 Aplikace ventilu při rozvodu stlačeného vzduchu [15]



Obr. 2.6 Kulový ventil DN 125 - 500 [16]

3. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY KULOVÉHO VENTILU

Cílem měření charakteristik ventilů, je grafické zpracování závislosti tlakového spádu na průtoku ventilem. Z takového grafického vykreslení naměřených hodnot je možné určit chování ventilu při různých průtocích a na základě těchto informací zvolit vhodný ventil pro danou aplikaci.

Charakteristiky ventilů se zpravidla určují na základě experimentu a je možné měření provádět i za provozu v praxi. Charakteristiky se následně vykreslují pro různé úhly otevření, viz obr. 3.19.

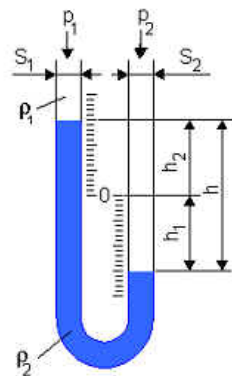
Určování charakteristik je spojeno s měřením jednotlivých parametrů na základě kterých se vykresluje. Tyto parametry jsou tlak a průtok. V následující podkapitole jsou zmíněná nejčastěji používaná měřidla tlaku a průtoku v technické praxi při experimentu.

3.1 Měřidla tlaku

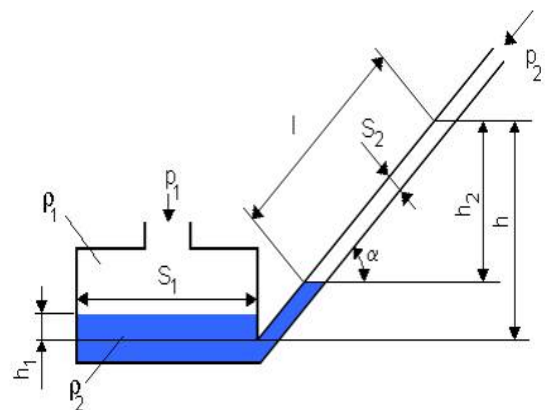
Slouží k určování hodnoty tlaku v měřeném místě. Tlakových měřidel je v dnešní době široká škála, volba typu měřidla závisí na různých okolnostech (druh média, teplotě, viskozitě, potřebné přesnosti atd.). Hlavní rozdíly mezi jednotlivými druhy měřidel jsou ve způsobu vyhodnocování tlaku (U-trubice, tlakoměrný prvek) a ve způsobu zobrazení tlaku (přímé a nepřímé zobrazení). V případě přímého zobrazení je možné hodnotu tlaku přímo odečíst na měřidle (displej, stupnice) u nepřímého zobrazení je potřeba hodnotu tlaku dopočítat pomocí definovaného vztahu.

3.1.1 Hydrostatické tlakoměry

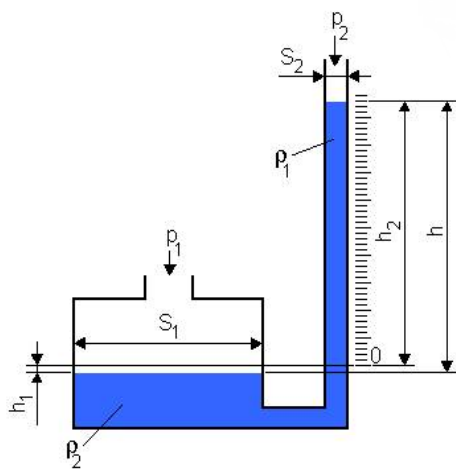
Princip jejich činnosti je založen na vychýlení hladin kapalinového sloupce vlivem hydrostatického tlaku. Jedná se o spolehlivé měřidla, které jsou využívána k laboratorním účelům, ale jejich nevýhoda nemožnosti dálkového přenosu signálu pro další zpracování z nich dělá v dnešní době méně používané tlakoměry. Rozdíl výšek hladin kapalinového sloupce nepředstavuje velikost tlaku, proto je potřeba tlak vypočítat pomocí vztahu $\Delta p = h \cdot \rho \cdot g$, kde h je výška rozdílu hladin kapalinového sloupce [8], viz obr. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4.



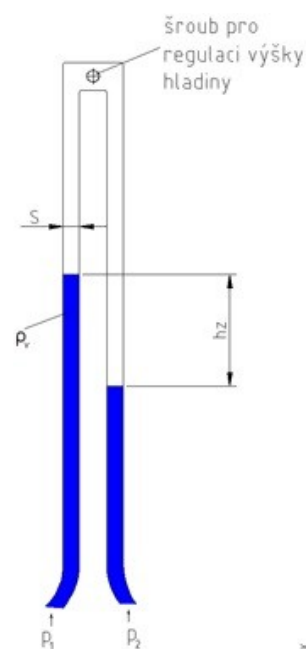
Obr. 3.1 U - trubice [17]



Obr. 3.2 Tlakoměr se sklonným ramenem [17]



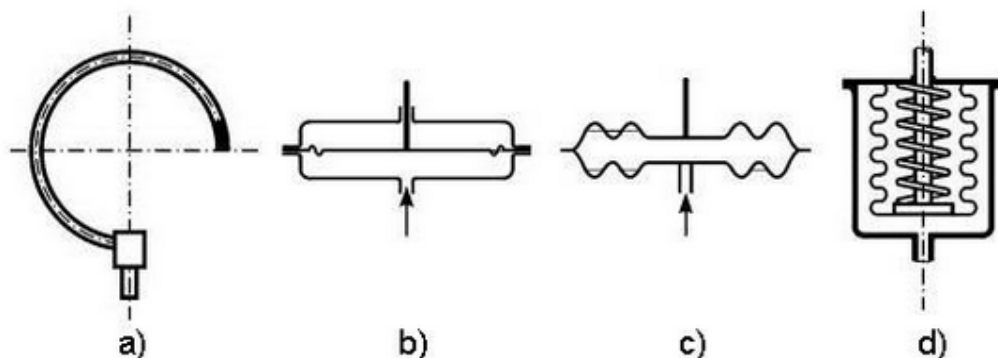
Obr. 3.3 Nádobkový tlakoměr [17]



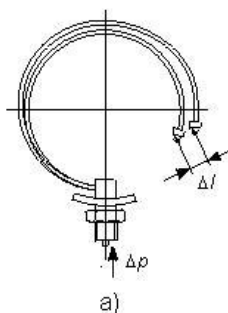
Obr. 3.4 Obrácená U - trubice

3.1.2 Deformační tlakoměry

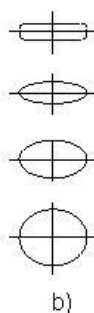
Princip činnosti deformačních tlakoměrů je založen na pružné deformaci a tím změně geometrického tvaru tlakoměrného prvku vlivem působení tlaku kapaliny. Míra deformace prvku je přímo úměrná hodnotě tlaku dle Hookova zákona, která je převedena na mechanický ukazatel a stupnici nebo na elektrický případně pneumatický signál [9], viz obr. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8.



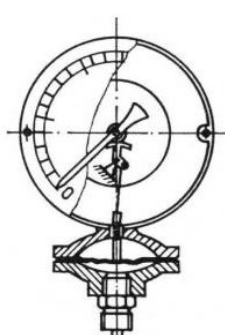
Obr. 3.5 Druhy tlakoměrných prvků a) Bourdonova trubice, b) membrána, c) krabice, d) vlnovec [9]



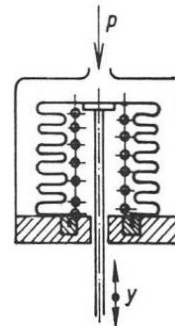
Obr. 3.6 Trubicový tlakoměr [9]



Obr. 3.7 Membránový tlakoměr [9]

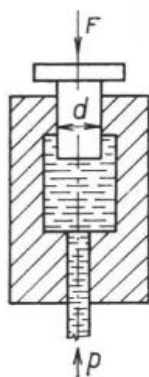


Obr. 3.8 Vlnovcový tlakoměr [9]

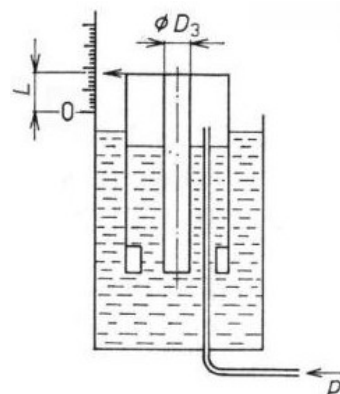


3.1.3 Pístové tlakoměry

Tlak kapaliny působí na pístové měřidlo, které je vyvažováno závažím případně pružinou. Pomocí známé velikosti pístu a vyvažovací hodnoty se hodnota tlaku přepočítá pomocí jednoduchého vztahu $p = (G_p + G_z)/S$, kde G_p a G_z jsou tíhy pístu a závaží a S je čelní plocha pístu. Tyto tlakoměry se používají nejčastěji ke kalibračním účelům [10], viz obr. 3.9, 3.10.



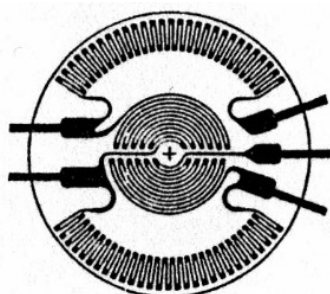
Obr. 3.9 Pístový tlakoměr [10]



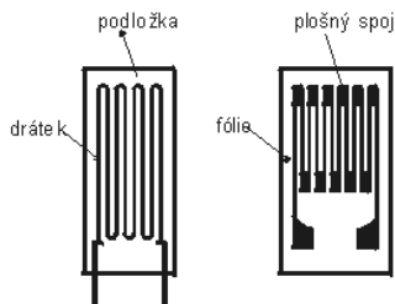
Obr. 3.10 Zvonový tlakoměr [10]

3.1.4 Elektrické převodníky tlaku

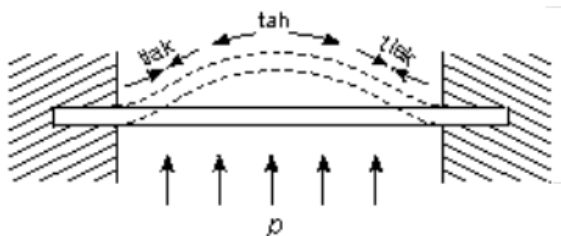
Vliv působení tlaku kapaliny je prostřednictvím deformace tlakoměrného prvku převáděn na elektrický signál (odpor, náboj, kapacita atd.). Jejich velkou výhodou je dálkový přenos signálu a možnost jeho elektronického zpracování [11], viz obr. 3.11, 3.12, 3.13.



Obr. 3.11 Odporový tenzometr [11]



Obr. 3.12 Kovové odporové tenzometry [11]



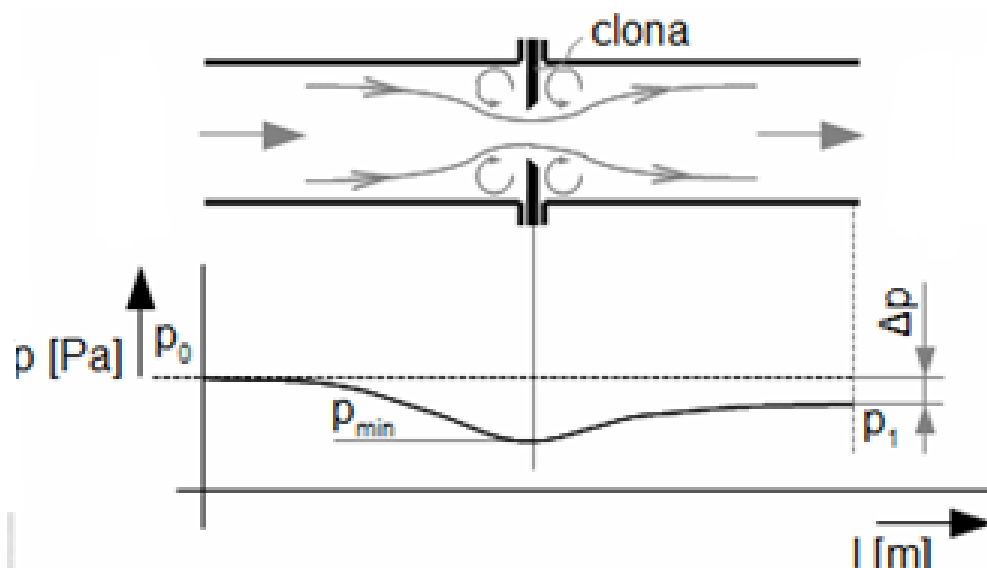
Obr. 3.13 Polovodičové tenzometry [11]

3.2 Měřidla průtoku

Měření průtoku je také definováno jako měření rychlosti kapaliny skrze průtočnou plochu. Měřidla jsou schopná určit velikost průtoku v daném potrubí. Průtok se uvádí jako objemový Q_v , nebo hmotnostní Q_m . Dnešní moderní přístroje pro určení velikosti průtoku jsou vybavena displejem, který dokáže hodnotu průtoku zobrazit a není nutné průtok dopočítávat.

3.2.1 Měření průtoku clonou

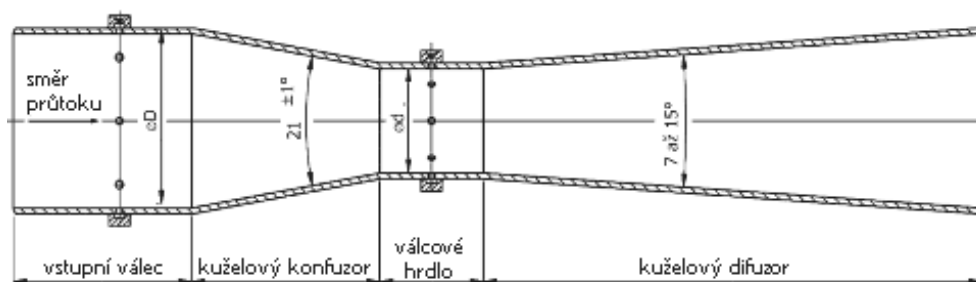
Clona představuje desku kruhového průřezu, která se vkládá do potrubí. Kruhová díra v desce je menšího průměru než samotné potrubí, viz obr. 3.14. Tato deska způsobuje v potrubí nárůst rychlosti proudění a způsobuje tlakovou diferenci, která se měří pomocí U - trubice. Pro výpočet průtoku se hodnota rozdílu výšek hladin kapalinového sloupce se dosadí do cejchovní rovnice clony (3.2).



Obr. 3.14 Clona [12]

3.2.2 Měření průtoku Venturiho trubici

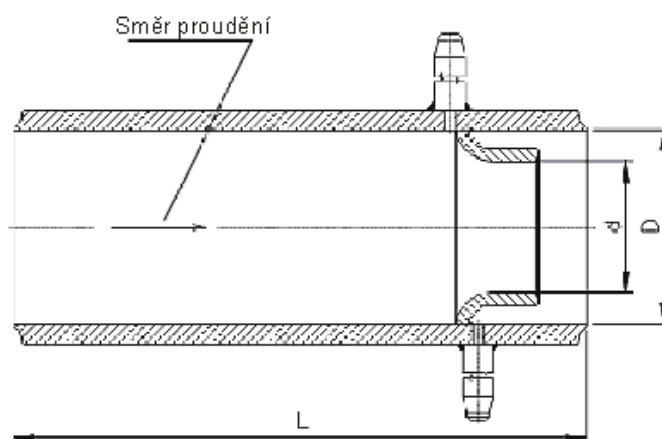
Venturiho trubice sestává ze tří částí (konfuzor, válcové hrdlo, difuzor), viz obr. 3.15. V konfuzoru dochází k postupnému zrychlení proudící kapaliny a tím ke snížení statického tlaku, který se měří před konfuzorem a ve válcovém hrdle pomocí U - trubice. Na základě naměřeného rozdílu výšek hladin kapalinového sloupce se vypočítá velikost průtoku. Proudící kapalina se následně v difuzoru postupně zpomaluje na hodnotu před vstupem. Toto měření je velice výhodné, jelikož měřicí prvek vytváří minimální tlakový spád v obvodu, nevýhodou je drahá pořizovací cena [13].



Obr. 3.15 Venturiho trubice [13]

3.2.3 Měření průtoku dýzou

Dýza je měřicí prvek, který využívá výhod clony a některých výhod Venturiho trubice. Hlavním rozdílem je, že oproti Venturiho trubici nemá difuzor, viz obr. 3.16. Měří se tlak před dýzou a v oblasti mezikruží za dýzou. Výhodou tohoto měřicího prvku je, že oproti cloně může měřit větší průtoky a také kapaliny nebo média s většími pevnými částicemi. Ve srovnání s Venturiho trubicí je levnější, ale vytváří v potrubí větší tlakový spád [13].



Obr. 3.16 Dýza [13]

3.3 Měření $\Delta p - Q$ charakteristiky kulového ventilu na vodní trati

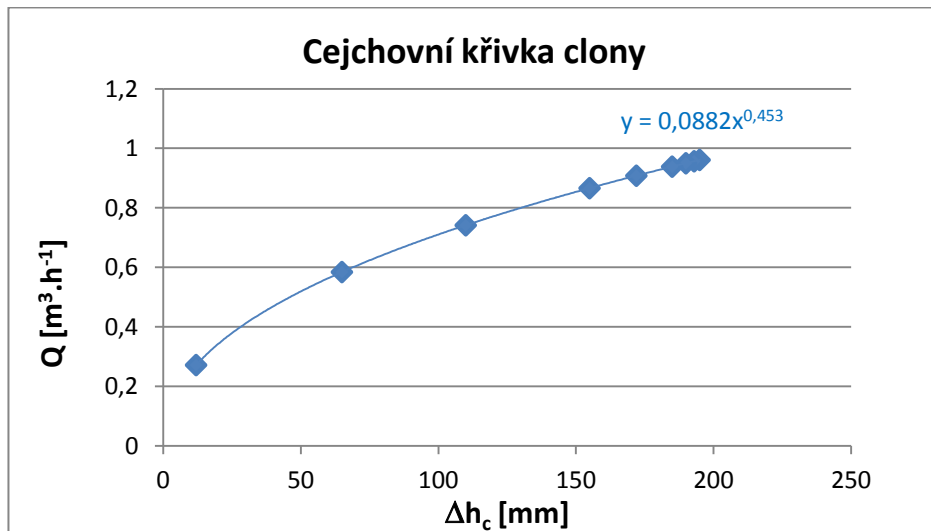
Měření charakteristiky kulového ventilu bylo prováděno v laboratoři (E306) na vodní trati vyrobené z plastových komponentů [20]. Každá prvek v obvodu má vytvořená odběrná místa před a za prvkem, která jsou napojena na U-trubicí, pomocí které je možné odečíst rozdíl výšek hladin a dosadit jej do rovnice:

$$\Delta p = \Delta h_p \cdot \rho \cdot g \quad (3.1)$$

z této rovnice se vypočítá tlakový spád na měřeném prvku.

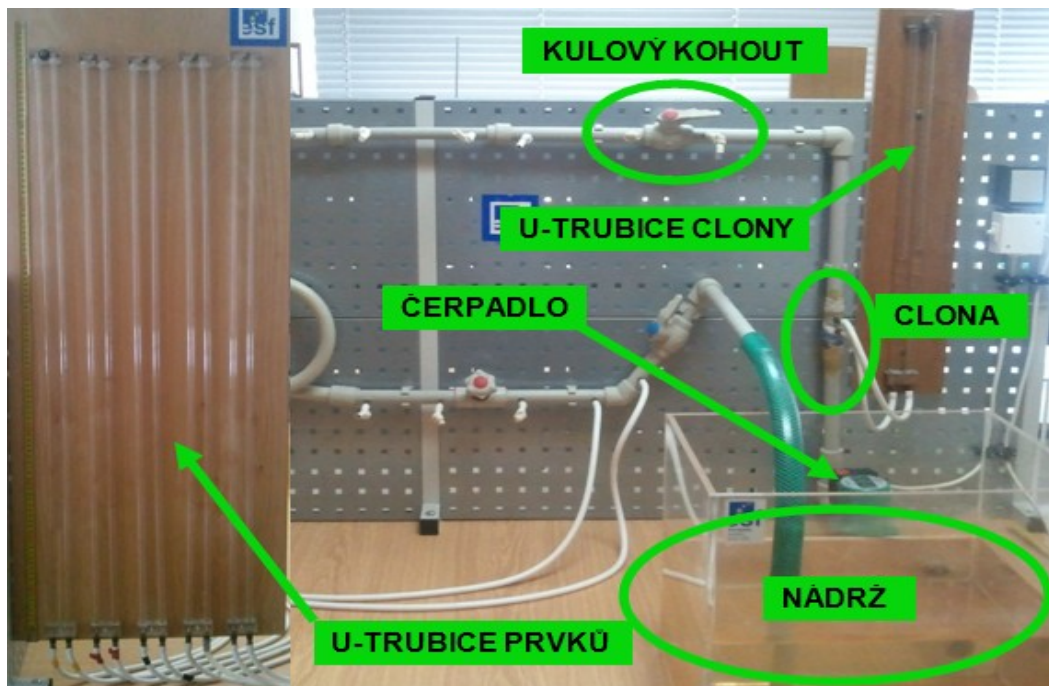
Velikost průtoku obvodem je určován prostřednictvím ztrátové výšky Δh na U-trubici clony a známé cejchovní křivky clony:

$$Q = 0,0882 \cdot \Delta h_c^{0,453} \quad (3.2)$$



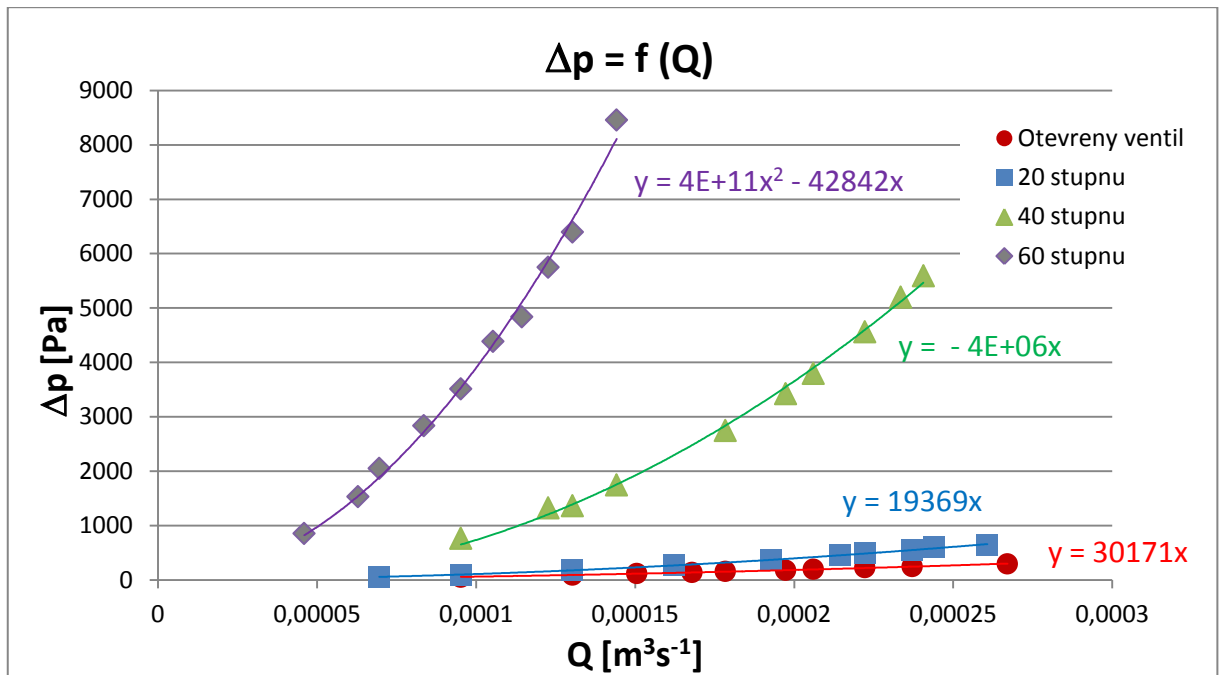
Obr. 3.17 Cejchovní křivka clony

Do této cejchovní rovnice clony se dosadí odměřená hodnota rozdílu výšek hladin na U-trubici a vypočítá se velikost průtoku. Ukázka experimentálního zařízení s popisem jednotlivých prvků je na obr. 3.18.



Obr. 3.18 Zkušební měřicí obvod

Na základě naměřených a vypočtených hodnot je možné vykreslit $\Delta p = f(Q)$ charakteristiku po kulový ventil, viz obr.3.19. Z charakteristiky je viditelný rozdíl mezi jednotlivými charakteristikami pro jednotlivá otevření ventilu



Obr. 3.19 Vykreslení $\Delta p - Q$ charakteristiky

4. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ SKUTEČNÝCH KAPALIN

Řešení proudění pomocí matematických modelů je založeno na definici přenosových jevů na zákony zachování hmoty a hybnosti. Pomocí matematického modelování lze řešit proudění ideálních i skutečných kapalin v řadě technických odvětví (hydraulika, energetika, životní prostředí atd.). V souvislosti s definovanou problematikou lze řešit proudění:

- rovinné dvojrozměrné, osově symetrické a obecné trojrozměrné
- stlačitelné i nestlačitelné
- přestupem tepla, přirozená a smíšená konvekce a radiace
- chemických příměsí včetně chemických reakcí
- vícefázové, s volnou hladinou (plyn, kapalina, pevná fáze)
- spalování (kapalně, plynně a pevné paliva)
- stacionární a nestacionární proudění atd.
- porézním prostředím
- za rotace nebo vzájemného pohybu oblastí

Moderní počítačová technika umožňuje numerické modelování výše popsaných fyzikálních jevů pomocí různých softwarů. V technické praxi je matematické modelování velice výhodné, vzhledem k tomu, že můžeme výsledky numerické simulace porovnat s výsledky experimentu a případně eliminovat chyby jak v modelu tak v měření. Je důležité podotknout, že v oblasti matematického modelování proudění je potřeba nahlížet k obezřetnosti, jelikož problematika turbulentního proudění stále není dořešena [2].

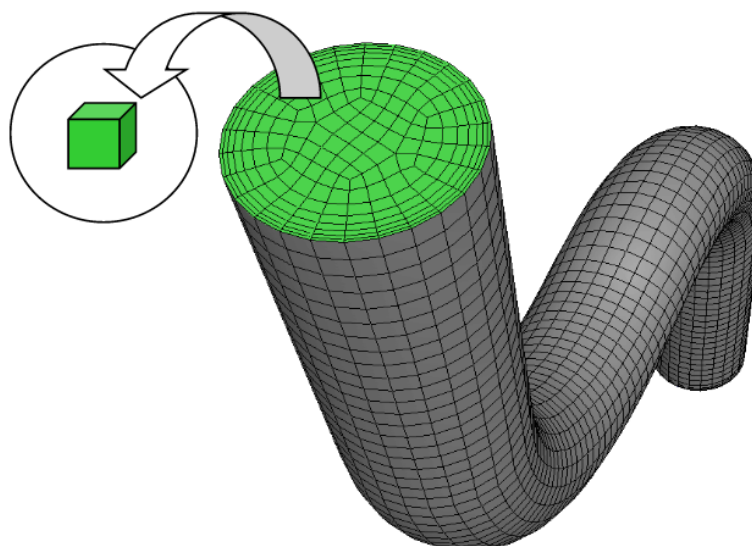
V dnešní době se využívá více metod k modelování proudění, metody se nazývají tzv. diskretizační přístupy:

- Metoda sítí (metoda konečných diferencí)
- Metoda konečných prvků
- Metoda konečných objemů

4.1 Metoda konečných objemů (MKO)

Metoda konečných objemů je používána v oblasti řešení parciálních diferenciálních rovnic popisujících stlačitelné a nestlačitelné proudění kapalin. Cílem numerických výpočtů je hledání diskrétních řešení v diferenciálních rovnicích. Tato diskrétní řešení jsou definována v malých podoblastech základní oblasti pomocí systému tzv. diferenčních rovnic. Výsledkem řešení je rozdíl mezi diferenciálními a diferenčními rovnicemi tzv. diskretizační chyba. Tato metoda spojuje **metodu sítí** (metoda konečných diferencí) a **metodu konečných prvků**, díky tomu je možnost řešit složitější geometrie a s dostatečnou přesností modelovat rovnice zachování jednotlivých veličin ve všech buňkách. Princip metody konečných objemů lze definovat [4]:

- rozdělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě, viz obr. 4.1.
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace
- numerické řešení diskretizovaných rovnic v obecném tvaru



Obr. 4.1 Rozdělení oblasti na malé objemy [3]

4.2 Popis definovaného matematického modelu proudění skutečné kapaliny

Definovaný matematický model v aplikaci na proudění ventilem je charakterizován jako:

- proudění nestlačitelné kapaliny - hustota $\rho = \text{konst.}$
- proudění izotermní - teplota kapaliny $T = \text{konst.}$
- proudění ustálené kapaliny $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

Rovnice kontinuity, základní tvar pro skutečnou stlačitelnou kapalinu v případě neustáleného proudění:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

jelikož se jedná o stacionární ustálené proudění nestlačitelné kapaliny, kde hustota je konstantou a časová derivace nulová, je možné vztah zjednodušit:

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = 0 \quad (4.2)$$

Rovnice pro přenos hybnosti (Navier – Stokesova rovnice):

$$\overline{u_j} \frac{\partial(\overline{u_i})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} \quad (4.3)$$

4.2.1 Dvourovnicový matematický model $k - \varepsilon$

Tento dvourovnicový model je jeden z nejpoužívanějších modelů založený na Bussinesqově hypotéze, který je schopen řešit složité typy turbulentního proudění a určit délková i časová měřítka. Délkové měřítko zde charakterizuje velikost energie, která je obsažená ve velkých vírech. Je tvořen dvěma transportními rovnicemi k a ε , kde k je turbulentní kinetická energie a ε je rychlost disipace turbulentní energie.

Základní složkou matematického modelu $k - \varepsilon$ je turbulentní kinetická energie k , která se odvozuje z rovnice zachování hybnost a je definována:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - c_D \underbrace{\frac{k^{3/2}}{l}}_{\varepsilon} \quad (4.4)$$

rovnice pro rychlost disipace ε je definována:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} \nu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.5)$$

Výsledný matematický model proudění je tvořen soustavou parciálních diferenciálních rovnic (rovnice kontinuity, rovnice přenosu hybnosti, transportní rovnice k a transportní rovnice rychlosti disipace ε)

Model $k - \varepsilon$ je obecný model, který je definován ve třech modifikacích:

- $k - \varepsilon$ Standart
- $k - \varepsilon$ RNG
- $k - \varepsilon$ Realizable

Model $k - \varepsilon$ Standart

Model $k - \varepsilon$ Standart je semi-empirický model, který je založen na úvahách a empirii. Předpokládá se, že proudění je vyvinuto v plně turbulentní a molekulární viskozita zde nemá vliv. Vlivem toho je tento model vhodný pouze pro proudění při vysokých Reynoldsových číslech. Proto se později vyvinuly z tohoto modelu jeho modifikace, které se snaží odstranit nedostatky, zatímco využívá jeho výhod [5].

Model $k - \varepsilon$ RNG

Je modifikací modelu $k - \varepsilon$ Standart při využití matematického postupu tzv. metoda renormalizačních grup (renormalization group method RNG). Funkce této metody spočívá v postupné eliminaci malých vírů. Oproti metodě Standart je rovnice pro rychlost disipace ε rozšířena o člen R_{ε} , který zvyšuje přesnost výpočtu při vyšších rychlostech. Definice členu je popsána v literatuře [5].

Model $k - \varepsilon$ Realizable

Tento model vznikl modifikací dvou předchozích modelů, patří mezi nejnovější. Obsahuje nově formulované rovnice turbulentní viskozity k a rychlosti disipace ε . Název "realizable" znamená, že tento model je schopen řešit jisté matematické překážky v oblasti Reynoldsových napětí turbulentního proudění. Oproti modelu Standart je schopen řešit proudění s velkým zakřiveným proudem, víry případně rotaci [5].

4.2.2 Dvourovnicový matematický model $k - \omega$

Tento dvourovnicový matematický model vychází ze základního obecného modelu $k - \varepsilon$. Podobně jako výše zmíněný model řeší dvě transportní rovnice k a ω , kde k je turbulentní kinetická energie stejně definovaná jako u výše zmíněného modelu a ω představuje rovnici pro specifickou disipaci energie. Jeho významnou výhodou je možnost integrovat rovnici ω přes viskózní podvrstvu bez jakýchkoli dalších podmínek [5].

Model $k - \omega$ Standart

Je ve FLUENTU modifikací Wilcoxova základního modelu $k - \omega$ zahrnující nízká Reynoldsova čísla, stlačitelnost kapaliny a smyková proudění. Negativním znakem $k - \omega$ modelu je citlivost řešení transportních rovnic ve volném proudě mimo smykové vrstvy, toto slabé místo je ale v modelu Standart částečně odstraněno přesto ale může mít značný vliv při

řešení. Jeho hlavní výhodou je přesnost v blízkosti stěny, ale s přibývajícím vzdáleností přesnost klesá [5].

Model $k - \omega$ SST (Shear - Stress Transport)

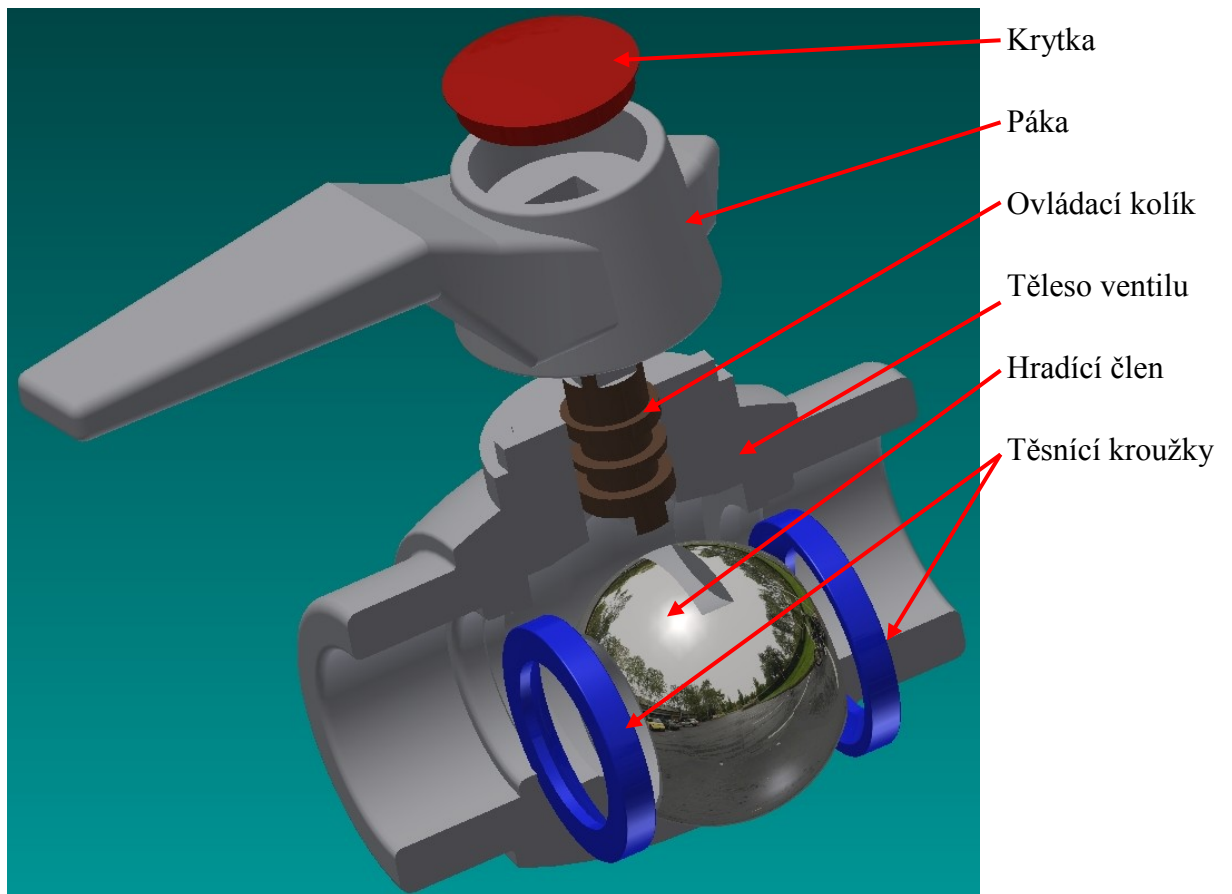
Předností tohoto modelu je spojení výhod dvou základních modelu $k - \varepsilon$, který se vyznačuje vyšší přesností ve volném proudu dále od stěn a modelu $k - \omega$, který je přesnější v oblasti blízko stěny [5].

5. APLIKACE DEFINOVANÉHO MATEMATICKÉHO MODELU A NUMERICKÝ VÝPOČET

Táto kapitola se bude zabývat přímou aplikací výše uvedených modelů na geometrii kulového ventilu. Pro srovnání možné odlišnosti výsledků u jednotlivých modelů byly zvoleny čtyři základní dvourovnicové matematické modely ($k - \varepsilon$ Standart, $k - \varepsilon$ RNG, $k - \omega$ Standart a $k - \omega$ SST). Geometrie tohoto ventilu byla vytvořena na základě odměřených rozměrů jednotlivých komponentů prvku pro čtyři úhly otevření, viz obr. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5. Takto vytvořené geometrie byly následně vyexportovány pro software ANSYS Fluent. Následně pokračuje vytvoření výpočetní sítě v softwaru ANSYS Meshing, nastavení výpočtového modelu, definice okrajových podmínek a numerický výpočet.

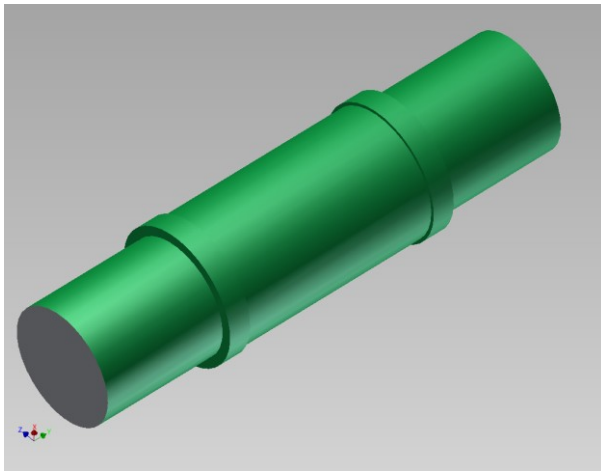
5.1 Tvorba geometrie kulového ventilu

Vzhledem k tomu, že geometrie kulového ventilu nebyla pro účely této diplomové práce vytvořena, bylo potřeba tento prvek vytvořit pomocí programu Inventor. Pro tvorbu geometrie ventilu bylo nutno zjistit rozměry, které byly odměřeny na základě rozříznutí celého prvku. Jednotlivé části bylo nutné vytvořit a poté v sestavě spojit vazbami tak aby byl ventil funkční. Jednotlivé části ventilu jsou zobrazeny na obr. 5.1.

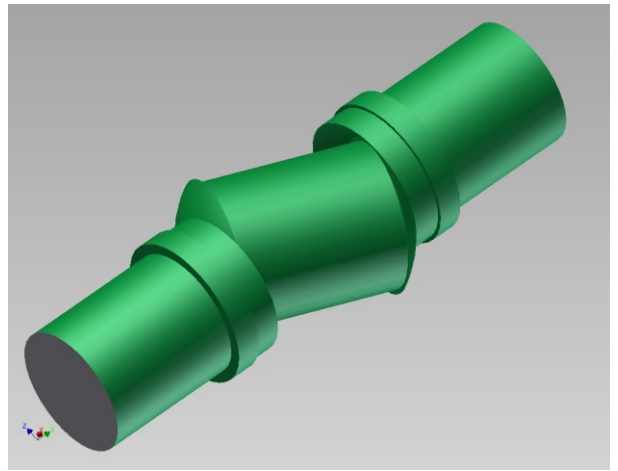


Obr. 5.1 Části ventilu

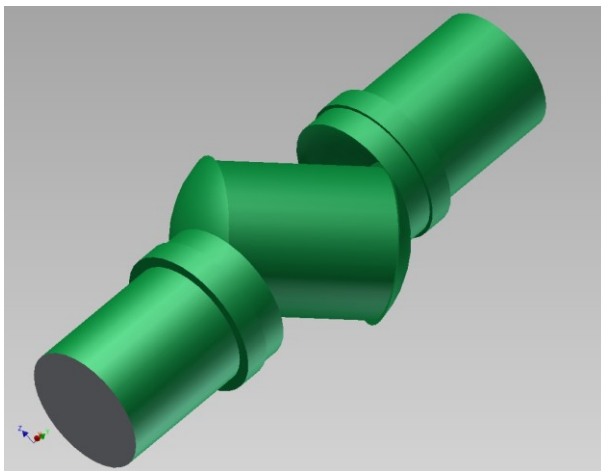
Pro správnou přípravu geometrie pro výpočet v softwaru ANSYS Fluent bylo potřeba vytvořit dutou část ventilu, ve které protéká médium (voda). Tuto geometrii bylo potřeba vytvořit pro všechny úhly otevření. Vzhledem k tomu, že software ANSYS není kompatibilní s formátem, do kterého běžně Inventor ukládá soubory sestav a jednotlivých částí sestavy, bylo potřeba převést soubor do formátu "STEP". Na následujících obrázcích je náhled na vnitřní geometrii kulového ventilu pro následný výpočet v softwaru ANSYS Fluent, viz obr. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5.



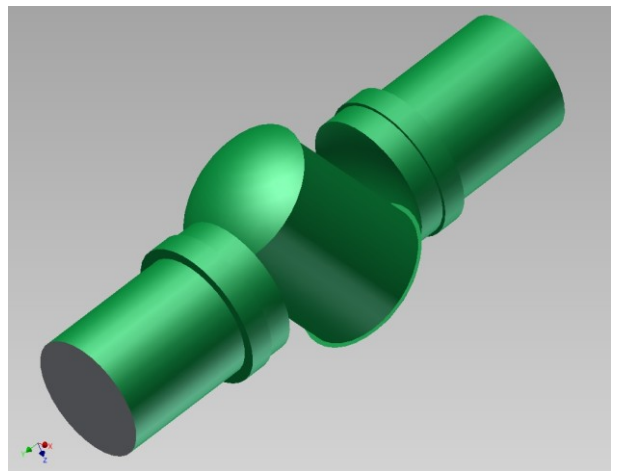
Obr. 5.2 Otevření 0°



Obr. 5.3 Otevření 20°



Obr. 5.4 Otevření 40°

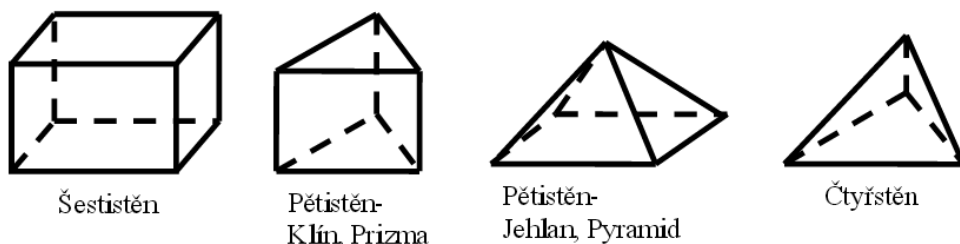


Obr. 5.5 Otevření 60°

5.2 Tvorba výpočetní sítě

Tvorba výpočetní sítě spočívá v rozdělení výpočtové geometrie na malé na sebe navazující 2D nebo 3D buňky (tzv. síť). Ve středech těchto buněk probíhá numerické řešení diferenciálních, algebraických případně empirických rovnic, které jsou specifické pro daný turbulentní model. Počet těchto buněk se odvíjí od složitosti geometrie, často se geometrie modelu skládá z milionů či desítek milionů buněk, takto vysoký počet elementů má pak kladný vliv na přesnost výpočtu, ale negativní vliv na dobu samotného výpočtu, protože se pro každou buňku počítá řada veličin. Z důvodu časové náročnosti výpočtu vlivem vysokého počtu buněk, je nezbytné počet zredukovat na co jak možno nejnižší nutné minimum, ale ne takové minimum, aby to mělo vliv na kvalitu sítě. Pojem kvalitní síť se myslí taková síť, aby celá geometrie byla pokryta na sebe navazujícími pravidelně po celém objemu rozloženými elementy. Velikost jednotlivých elementů by měla být přiměřená, tak aby bylo možné zachytit daný modelovaný děj. Výpočetní oblast bývá složena ze dvou částí, jedna část

je oblast, ve které neprobíhají pro řešitele zajímavé děje proto je možné v téhle oblasti buňky ponechat řidší zatímco v druhé oblasti častokrát probíhají děje, které jsou pro řešitele klíčové pro vyhodnocení daných veličin, proto se v těchto oblastech buňky zhušťují, viz obr. 5.10. V dnešní době je možné v softwaru ANSYS Fluent využít více typů konečných elementů. Volba typu buňky závisí na složitosti geometrie řešené oblasti a na typu úlohy [6]. Ukázka použitelných elementů pro tvorbu výpočetní sítě, viz obr. 5.6.



Obr. 5.6 Typy elementů sítě výpočetního softwaru ANSYS Meshing

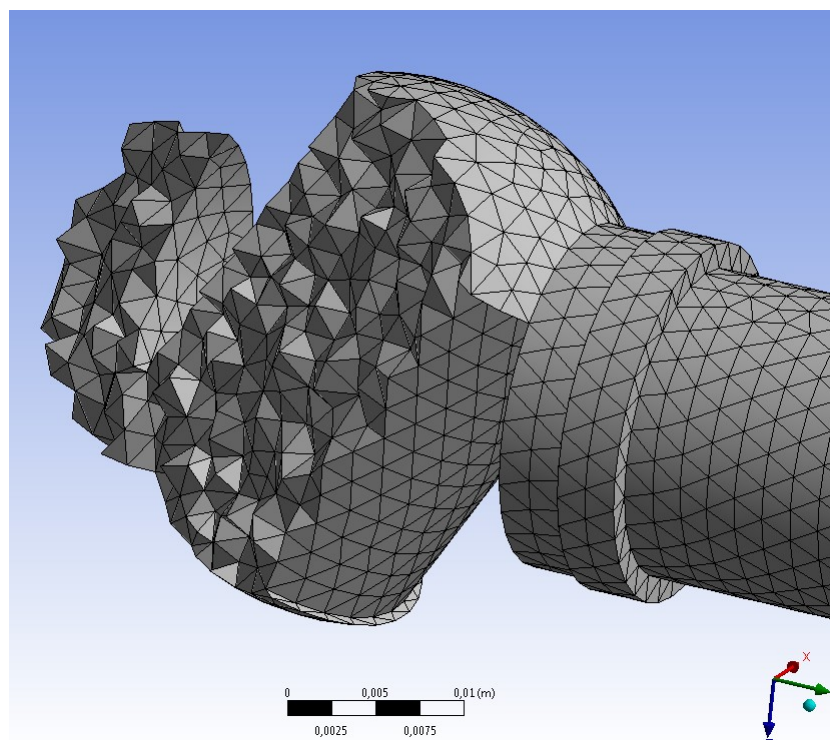
Hustota výpočetní sítě ovlivňuje:

- rychlost konvergence
- výpočetní přesnost
- čas výpočtu
- hardwarové nároky PC

K vytvoření výpočetní sítě byl využit software ANSYS Meshing, kde lze definovat různé typy elementu (tetrahedrons, hex dominant, triangels), viz obr. 5.6. Pro vysítování geometrie kulového ventilu byly využity čtyřstěnné elementy "tetrahedrons", kde byly předefinovány velikosti jednotlivých buněk na základě velikosti výpočtové oblasti. Definování velikosti buněk je zobrazeno, viz obr. 5.7.

| Sizing | |
|---|------------------|
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18,0 °) |
| <input type="checkbox"/> Min Size | 2, e-004 m |
| <input type="checkbox"/> Max Face Size | 2, e-003 m |
| <input type="checkbox"/> Max Size | 2, e-003 m |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1,10 |

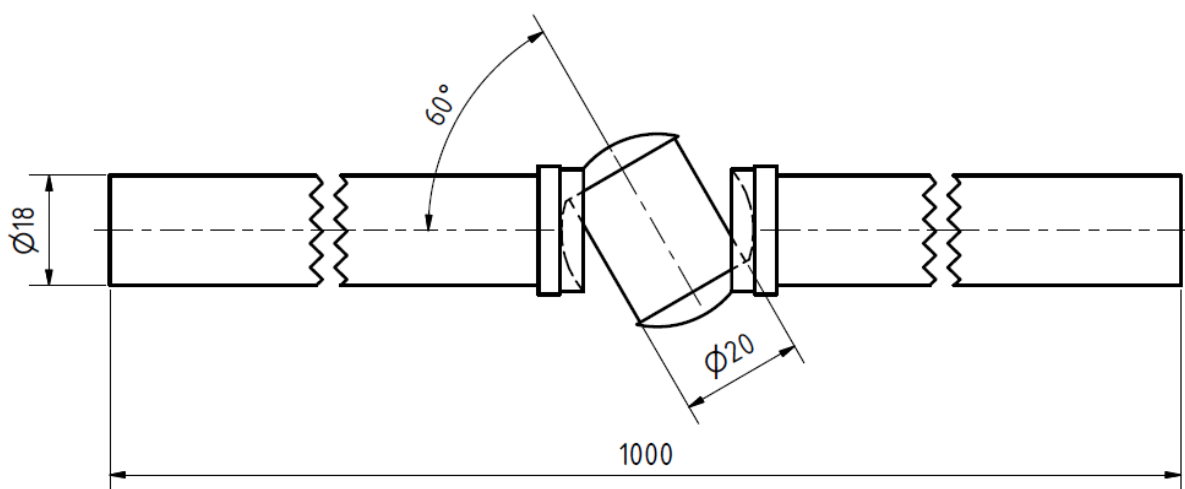
Obr. 5.7 Definování velikosti buňky



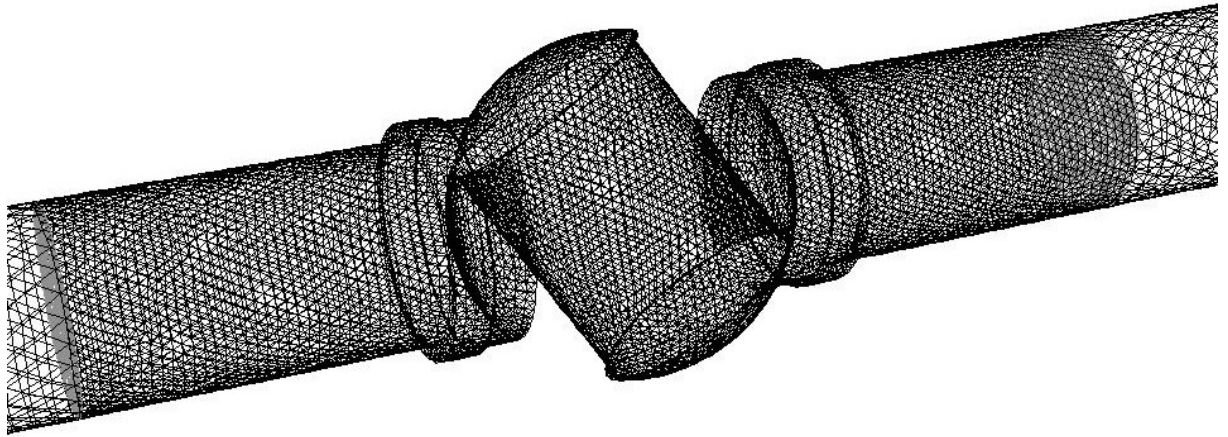
Obr. 5.8 Vzhled základní sítě geometrie

Vzhledem k tomu, že výpočetní geometrie má největší rozměr jeden metr, a nadefinovaná velikost buňky není dostatečně malá pro přesný výpočet bylo potřeba síť v oblasti, kde se mění velikost a směr průtoku zhustit, viz obr. 5.10.

S ohledem na předpokládané změny tlaku a rychlosti proudění v oblasti ventilu se provedly následující zhuštění výpočetní sítě, viz obr. 5.10. Rozměry výpočtové geometrie včetně kulového ventilu (průměr potrubí a průtočné plochy ventilu, délka a úhel natočení koule) jsou na obr. 5.9.



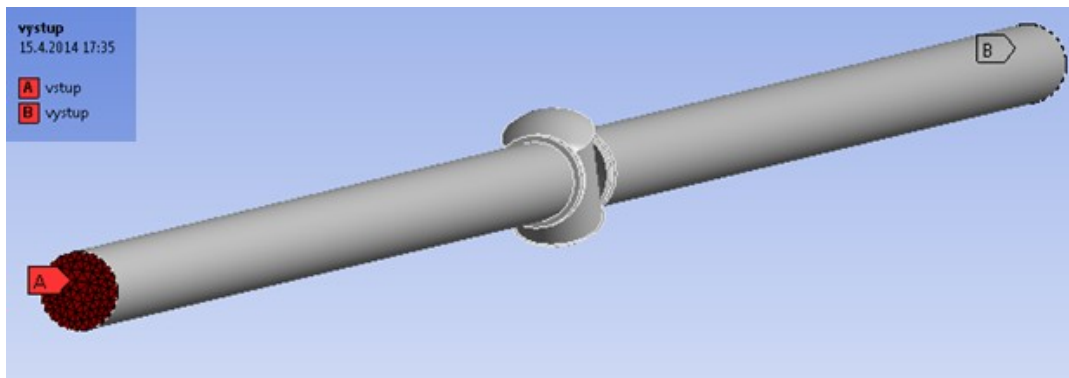
Obr. 5.9 Rozměry geometrie ventilu



Obr. 5.10 Zhuštěná síť v oblasti ventilu

Na obr. 5.10 je zobrazeno zhuštění sítě pomocí funkce "adapt - region". Přechodová oblast mezi zhuštěnou a původní sítí je místo, ve kterém se odečítají tlaky pro určení tlakového spádu. Základní nezhuštěná síť obsahovala 304 104 elementů v celé geometrii, díky zhuštění v měřené oblasti se tento počet elementů zvýšil na hodnotu 529 413 což je pro přesnost a časovou náročnost výpočtu dostačující.

V ANSYS Meshingu bylo potřeba také nadefinovat okrajové podmínky (vstup, výstup a stěnu potrubí) Vstupní okrajová podmínka, je oblast ve které bude do potrubí vstupovat médium, výstupní okrajová podmínka je oblast, která ústí do atmosféry, stěna je celý obal vnitřní ventilové části, tato oblast není potřeba definovat, je definována automaticky jako stěna „wall“.



Obr. 5.11 Vytvoření vstupní a výstupní okrajové podmínky

5.3 Nastavení numerického výpočtu v prostředí ANSYS Fluent

Po nadefinování okrajových podmínek v Meshingu jsem přešel do prostředí řešiče ANSYS Fluent, kde je potřeba nastavit nezbytné parametry výpočtu a okrajové podmínky matematického model.

Postup nastavení řešiče ANSYS Fluent

- **Adaptace sítě** - pomocí příkazu "adapt - region" - tento příkaz umožňuje zhustit síť ve zkoumané oblasti ventilové části. Pomocí souřadného systému se v jednotlivých osách nadefinují délkové hodnoty rozsahu zhuštění.
- **Models** - v této záložce se definuje výpočtový matematický model (k- ϵ , k- ω atd.)
- **Materials** - zde je nutné nastavit druh proudícího média (voda, vzduch olej atd.). Vzhledem k tomu že proudícím médiem v potrubí je voda byl typ proudícího média zvolena voda s vlastnostmi:
hustota $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$
viskozita $\nu = 1,003 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- **Boundary Conditions** - definování okrajových podmínek (vstup a výstup).
Vstupní okrajová podmínka: jako podmínka byla nadefinována hodnota hmotnostního průtoku (Mass Flow Rate [kg/s]), která byla stejná jako v případě experimentu. Je možné definovat i jiné okrajové (Vstupní tlak, vstupní rychlost atd.)
Výstupní okrajová podmínka: jako podmínka byla zvolena hodnota přetlaku na konci potrubí (Pressure Outlet [Pa]), který je nulový, protože ústí do atmosféry. Pro definici výstupní okrajové podmínky je možné definovat i jiné veličiny (výstupní tlak).
- **Solution Initialization** - nastavení počátečních podmínek proudového pole.
- **Run Calculation** - spuštění samotného výpočtu, kde se definuje počet iterací (kroků).

6. VÝPOČETNÍ PŘÍSTUPY, VYHODNOCENÍ ODPOROVÉHO A PRŮTOKOVÉHO SOUČINITELE A PRŮTOČNÉ PLOCHY

6.1 Varianty výpočtu průtokového součinitele

Průtokový součinitel jak pro naměřené tak pro numericky vyhodnocené hodnoty je z důvodů ověření správnosti výpočtu počítán pomocí dvou různých vztahů. První varianta výpočtu průtokového součinitele je skrze ztrátový součinitel místních ztrát z Bernoulliho rovnice, druhá varianta výpočtu je z rovnice pro výpočet průtoku škrťacími armaturami.

6.1.1 Varianta I

První varianta výpočtu průtokového součinitele je počítána skrze rovnici pro určení ztrátového součinitele místních odporů ζ z Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \Rightarrow \zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v^2} \quad (6.1)$$

6.1.2 Varianta II

Druhá varianta výpočtu průtokového součinitele je počítána přímo z rovnice pro průtok škrťacími armaturami:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \Rightarrow \mu = \frac{Q}{S} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}} \quad (6.2)$$

6.2 Výpočet průtokového součinitele a průtočné plochy

6.2.1 Varianta I - postup výpočtu průtokového součinitele

Z naměřené hodnoty rozdílu hladin kapalinového sloupce se přes cejchovní rovnici clony vypočítá hodnota průtoku:

$$Q = 0,0882 \cdot \Delta h_c^{0,453} \quad (6.3)$$

Hodnota tlakového spádu na prvku se počítá z rovnice pro výpočet hydrostatického tlaku:

$$\Delta p = \Delta h_p \cdot \rho \cdot g \quad (6.4)$$

Tlakový spád se pro místní odpory v potrubí definuje takto:

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (6.5)$$

Ve vztahu se rychlost v nahradí vztahem pro výpočet rychlosti z průtoku a průtočné plochy:

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{S_0^2 \cdot 2} \quad (6.6)$$

Jednoduchou úpravou si z výše uvedené rovnice vyhodnotím koeficient K

$$\Delta p = \frac{\zeta \cdot \rho}{S_0^2 \cdot 2} \cdot Q^2 \Rightarrow \Delta p = K_I \cdot Q^2 \quad (6.7)$$

Vztah koeficientu K_I je roven:

$$K_I = \frac{\zeta \cdot \rho}{S_0^2 \cdot 2} \quad (6.8)$$

Po vyjádření ztrátového součinitele místního odporu z výše uvedeného vztahu se vztah upraví:

$$\zeta = \frac{2 \cdot S_0^2 \cdot K_I}{\rho} \quad (6.9)$$

V případě ventilu se častěji využívá inverzní vztah k rovnici (6.5):

$$Q = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (6.10)$$

kde součinitel μ je tzv. průtokový součinitel mající vztah ke ztrátovému součiniteli místních odporů ζ , který se dá odvodit z výše uvedené rovnice (6.10) a rovnice (6.6):

$$Q = \sqrt{\frac{1}{\zeta} \cdot \frac{2 \cdot S_0^2}{\rho} \cdot \Delta p} = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\Delta p} = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (6.11)$$

Z této rovnice je zřejmý vztah pro výpočet součinitele μ pomocí součinitele místních odporů ζ

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (6.12)$$

6.2.2 Varianta II - postup výpočtu průtokového součinitele

Vztah pro výpočet průtokového součinitele dle rovnice pro průtok škrťícími armaturami, viz (6.2)

$$Q = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (6.13)$$

Po úpravě vypadá rovnice takto:

$$Q = K_{II} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (6.14)$$

Za předpokladu že

$$K_{II} = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (6.15)$$

Vyjádřením průtokového součinitele z výše uvedené rovnice se vztah upraví takto:

$$\mu = \frac{K_{II}}{S_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (6.16)$$

6.2.3 Postup při výpočtu průtočné plochy

Velikost průtočné plochy je pro každé otevření ventilu jiná, prakticky je nemožné tuto hodnotu naměřit, proto je nutné tuto plochu vyhodnotit početním způsobem.

Pro plné otevření ventilu je tato průtočná plocha možná vypočítat ze známého vztahu:

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (6.17)$$

Hodnoty průtočných ploch pro jiná otevření ventilu 20°, 40° a 60° je potřeba dopočítat pomocí vztahu:

$$S_{20} = \frac{\mu_{20}}{\mu} \cdot S_0 \quad (6.18)$$

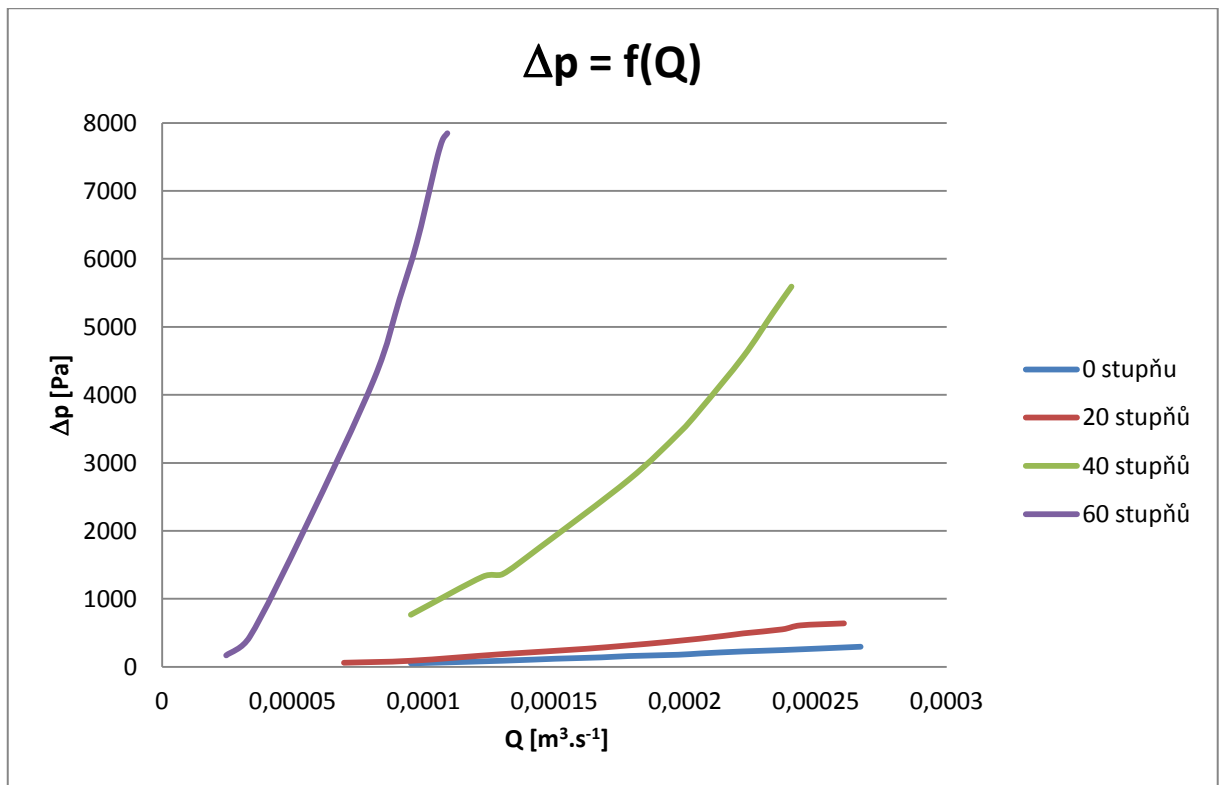
7. VÝPOČET A VYHODNOCENÍ HODNOT Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ

7.1 Výpočet a vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřené hodnoty na experimentálním zařízení jsou vyhodnoceny v tab. 7.1 pro jednotlivá otevření ventilu. Dále jsou vykresleny grafické závislosti ($\Delta p = f(Q)$, $\Delta p = (Q^2)$, $Q = (\Delta p^{1/2})$) pro jednotlivá otevření ventilu [20], viz obr. 7.1, 7.2, 7.3.

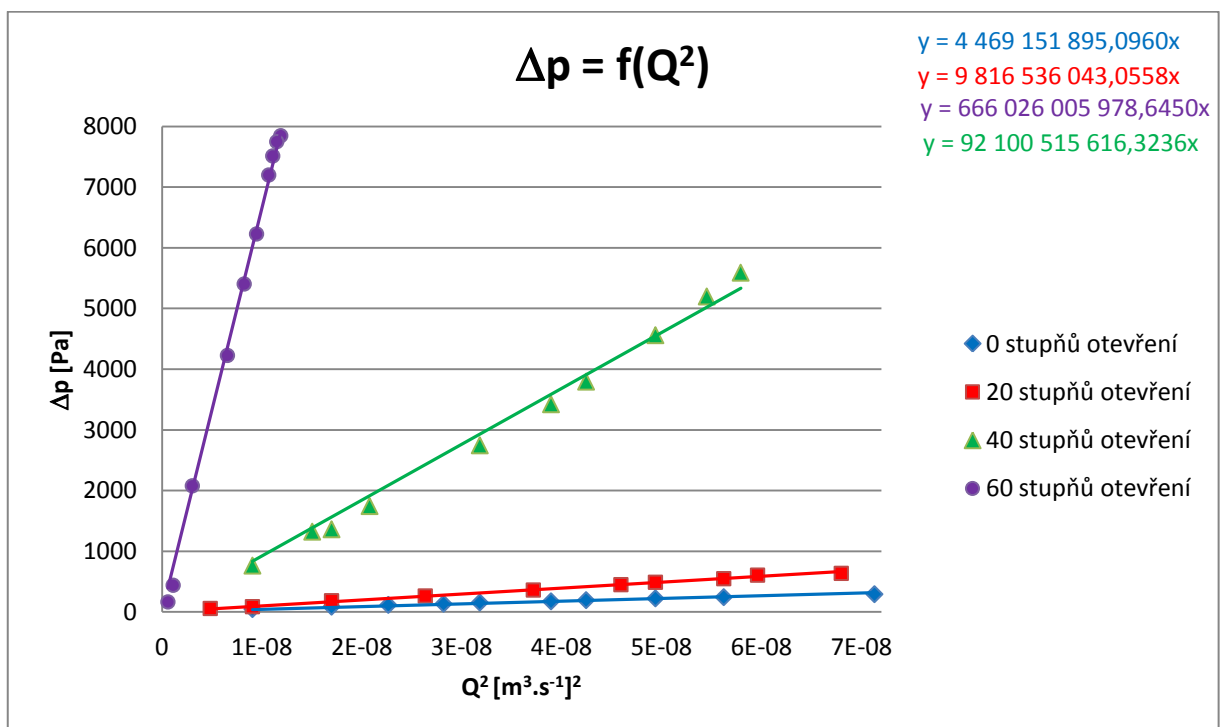
Tab. 7.1 Hodnoty průtoků a tlakových spádů

| č. | 0° | | 20° | | 40° | | 60° | |
|-----|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| | Q_v [$m^3 \cdot s^{-1}$] | Δp [Pa] | Q_v [$m^3 \cdot s^{-1}$] | Δp [Pa] | Q_v [$m^3 \cdot s^{-1}$] | Δp [Pa] | Q_v [$m^3 \cdot s^{-1}$] | Δp [Pa] |
| 1. | 0,000267 | 294,3 | 0,000260 | 637,65 | 0,000241 | 5591,7 | 0,000109 | 7848 |
| 2. | 0,000237 | 245,25 | 0,000244 | 578,79 | 0,000234 | 5199,3 | 0,000107 | 7749,9 |
| 3. | 0,000222 | 225,63 | 0,000237 | 549,36 | 0,000222 | 4561,65 | 0,000105 | 7514,46 |
| 4. | 0,000206 | 196,2 | 0,000222 | 490,5 | 0,000206 | 3796,47 | 0,000103 | 7200,54 |
| 5. | 0,000197 | 186,39 | 0,000214 | 451,26 | 0,000197 | 3423,69 | 0,000097 | 6229,35 |
| 6. | 0,000178 | 156,96 | 0,000193 | 362,97 | 0,000178 | 2746,8 | 0,000091 | 5405,31 |
| 7. | 0,000167 | 137,34 | 0,000162 | 264,87 | 0,000144 | 1746,18 | 0,000081 | 4228,11 |
| 8. | 0,00015 | 117,72 | 0,00013 | 186,39 | 0,000130 | 1363,59 | 0,000055 | 2079,72 |
| 9. | 0,00013 | 88,29 | 0,000095 | 98,1 | 0,000123 | 1324,35 | 0,000034 | 441,45 |
| 10. | 0,000095 | 49,05 | 0,000069 | 58,86 | 0,000095 | 765,18 | 0,000025 | 166,77 |



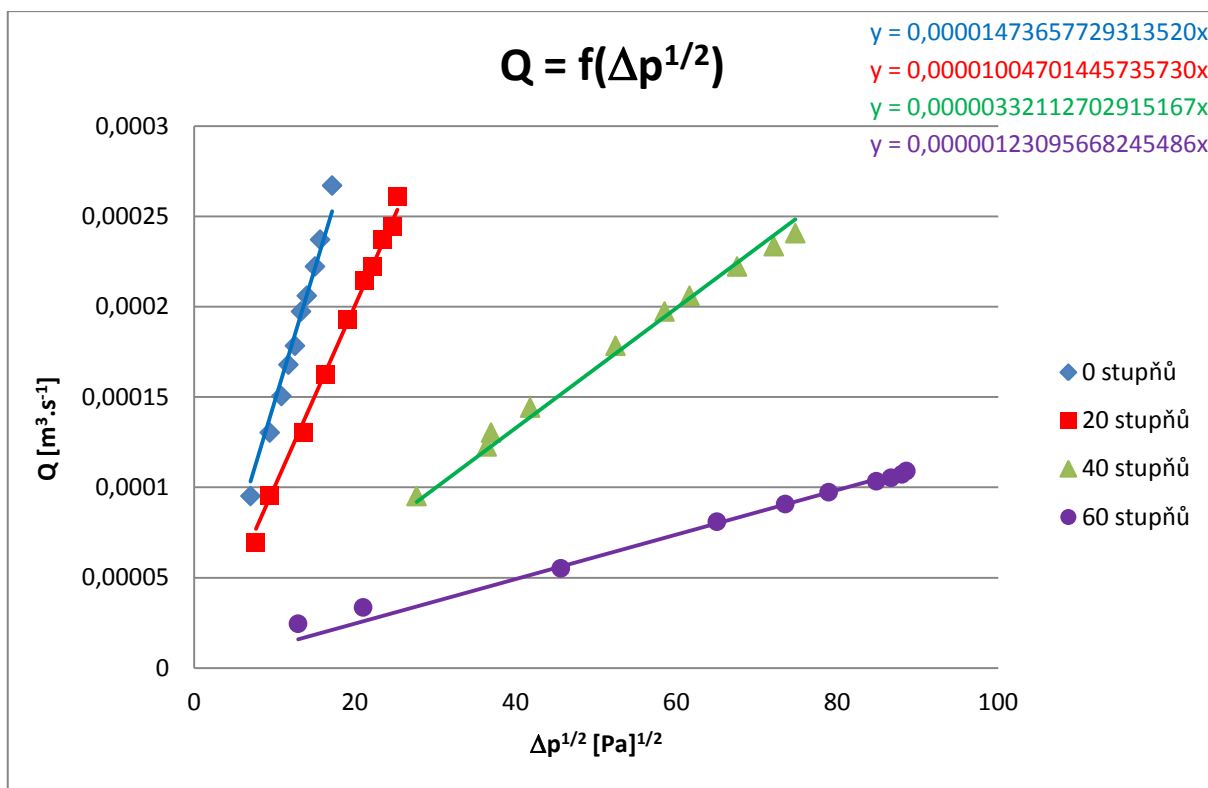
Obr. 7.1 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika naměřených hodnot

Z vypočtených hodnot tlakového spádu Δp a Q^2 se vykreslí grafická závislost, viz obr.7.2. Následně se proloží lineární regresní křivkou a vypíše se regresní rovnice křivky, kde konstanta v rovnici je rovna koeficientu K_I u výše uvedeného vztahu (6.7):



Obr. 7.2 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika

Pro druhou variantu výpočtu průtokového součinitele se graficky vykreslí $Q = f(\Delta p^{1/2})$, viz obr. 7.3. Vynesené body se proloží lineární regresní křivkou a vypíše se regresní rovnice, kde konstanta je rovna koeficientu K_H pro rovnici (6.14)



Obr. 7.3 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika

7.1.1 Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z naměřených hodnot dle výpočtu varianty I.

Vyhodnocení ztrátového součinitele ζ , průtokového součinitele μ a průtočné plochy ventilem S je uvedeno v tab. 7.2.

Tab. 7.2 Vyhodnocení součinitelů (ζ , μ) a průtočné plochy (S)

| | K_i | ζ | μ | S [mm ²] |
|------------|--------------------|----------------|---------------|------------------------|
| 0° | 4469151895 | 0,8822 | 1,0647 | 314,159 |
| 20° | 9816536043 | 1,9377 | 0,7184 | 211,974 |
| 40° | 92100515616 | 18,1799 | 0,2345 | 69,204 |
| 60° | 666026005979 | 131,4680 | 0,0872 | 25,735 |

Výpočet pro první řádek tab. 7.2

Do vztahu (6.9) se za koeficient K_I dosadí hodnota z lineární regresní rovnice pro plné otevření ventilu, a za průtočnou plochu S plocha pro plné otevření ventilu:

$$\zeta = \frac{2 \cdot S_0^2 \cdot K_I}{\rho} = \frac{2 \cdot 0,000314159^2 \cdot 4469151895}{998} = 0,8822$$

Hodnota průtokového součinitele se vypočítá pomocí součinitele místních odporů dle vztahu (6.12)

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} = \frac{1}{\sqrt{0,882174}} = 1,0647$$

Průtočná plocha při plně otevřeném ventilu se spočítá:

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4} = 0,000314159 \text{ m}^2$$

Pro otevření S_{20} se spočítá dle vztahu (6.17):

$$S_{20} = \frac{\mu_{20}}{\mu} \cdot S_0 = \frac{0,7184}{1,0647} \cdot 0,000314159 = 0,000211974 \text{ m}^2$$

pro ostatní otevření ventilu S_{40} a S_{60} se velikost průtočné plochy počítá analogicky.

7.1.2 Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z naměřených hodnot dle výpočtu varianty II.

Vyhodnocení průtokového součinitele μ , a průtočné plochy ventilem S je uvedeno v tab. 7.3.

Tab. 7.3 Vyhodnocení součinitele (μ) a průtočné plochy (S)

| | K_{II} | μ | S [mm ²] |
|-----|-------------|--------|------------------------|
| 0° | 1,47366E-05 | 1,0489 | 314,159 |
| 20° | 1,0047E-05 | 0,7151 | 214,185 |
| 40° | 3,32E-06 | 0,2364 | 70,801 |
| 60° | 1,23096E-06 | 0,0876 | 26,242 |

Výpočet pro první řádek tab. 7.3

Do rovnice (6.15) se dosadí hodnota koeficientu K_{II} odečtená z grafického vykreslení $Q = f(\Delta p^{1/2})$ pro dané otevření ventilu a za průřehovou plochu S_0 hodnota plochy pro plné otevření ventilu:

$$\mu = \frac{K_{II}}{S_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} = \frac{1,47366 \cdot 10^{-5}}{0,000314159} \cdot \sqrt{\frac{2}{998}} = 1,0489$$

Dále hodnota průřehové plochy pro další otevření ventilu S_{20} se určí dle vztahu (6.17)

$$S_{20} = \frac{\mu_{20}}{\mu} \cdot S_0 = \frac{0,7151}{1,0489} \cdot 0,000314159 = 0,000214185 \text{ m}^2$$

Hodnoty průřehových ploch pro další otevření S_{40} a S_{60} se spočítají analogicky dle výše uvedeného výpočtu.

7.2 Výpočet a vyhodnocení výsledků z matematického modelování

Průběh výpočtu hodnot z matematického modelování bude řešen stejným postupem a dle stejných variant řešení jako naměřené hodnoty, viz podkapitola 6.1.1, 6.1.2.

Pro názornou ukázkou bude níže graficky vyhodnocena situace pro dvě různá otevření ventilu 20° a 60° , ostatní situace otevření ventilu jsou graficky zpracovány v příloze.

7.2.1 Grafické zpracování výsledků z matematického modelování pro 20° a 60° otevření ventilu

V tabulkách pro numerické vyhodnocení výpočtu jsou uvedeny hodnoty získané z matematického modelování pro všechny řešené matematické modely 20° a 60° otevření ventilu. Pro 0° a 40° otevření ventilu jsou tabulky pro všechny matematické modely v příloze P.1 a P.2.

Tab. 7.4 Hodnoty Δp získané z matematického modelování pro 20° otevření ventilu

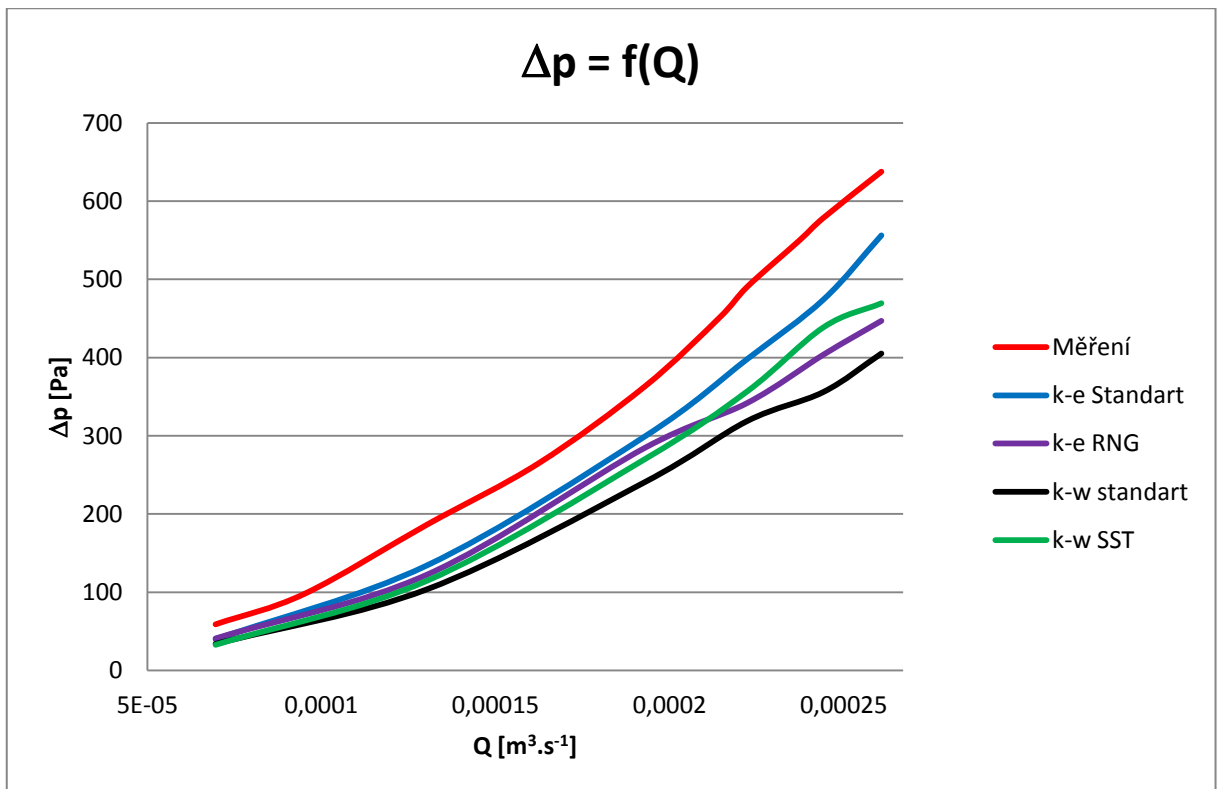
| 20° | k-ε Standart | k-ε RNG | k-ω Standart | k-ω SST |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Q [m ³ /s] | Δp [Pa] | Δp [Pa] | Δp [Pa] | Δp [Pa] |
| 0,000261 | 556,00 | 446,76 | 405,35 | 469,47 |
| 0,000244 | 474,17 | 403,68 | 356,26 | 445,97 |
| 0,000222 | 397,99 | 341,77 | 338,16 | 349,37 |
| 0,000193 | 299,09 | 284,36 | 240,85 | 270,18 |
| 0,000130 | 134,49 | 122,37 | 103,86 | 114,92 |
| 0,000069 | 39,87 | 40,78 | 34,03 | 32,96 |

Tab. 7.5 Hodnoty Δp získané z matematického modelování pro 60° otevření ventilu

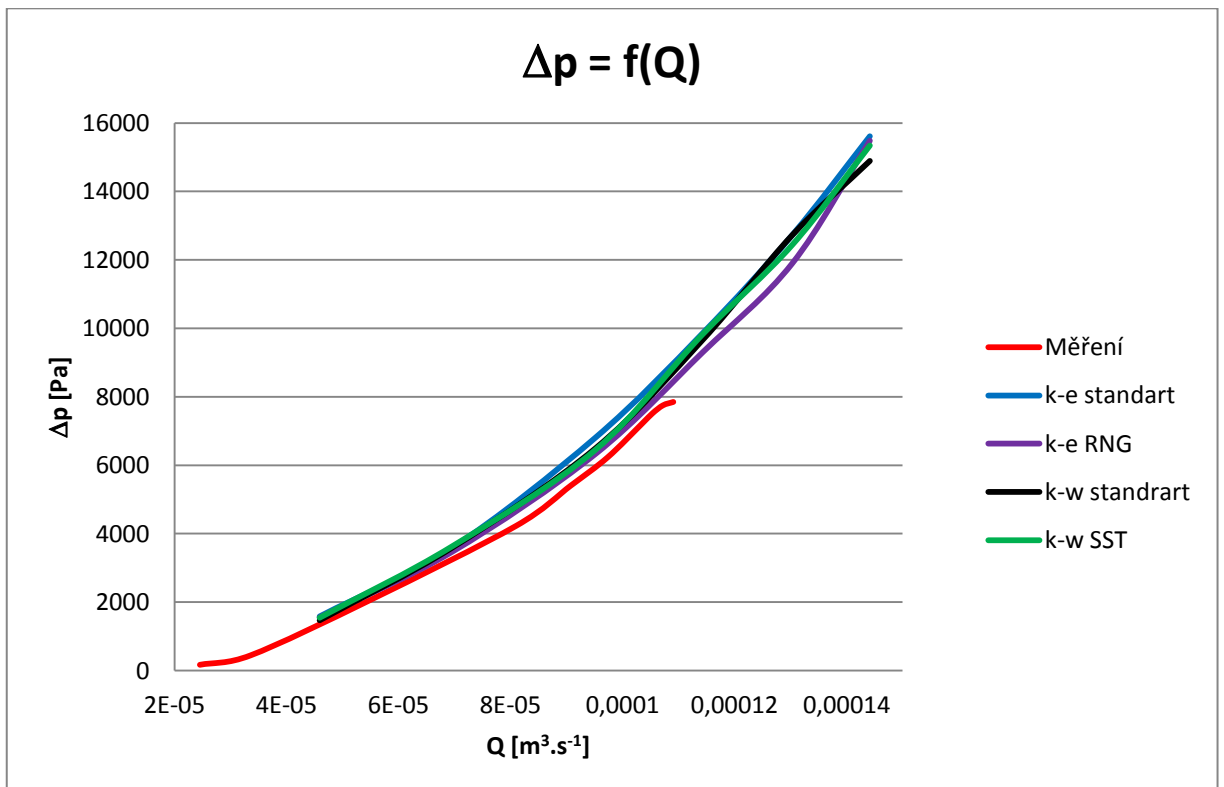
| 60° | k-ε Standart | k-ε RNG | k-ω Standart | k-ω SST |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Q [m ³ /s] | Δp [Pa] | Δp [Pa] | Δp [Pa] | Δp [Pa] |
| 0,000144 | 15611,79 | 15481,26 | 14895,83 | 15341,20 |
| 0,00013 | 12725,57 | 11895,71 | 12725,46 | 12436,55 |
| 0,000114 | 9870,34 | 9309,24 | 9677,19 | 9837,41 |
| 0,000095 | 6813,05 | 6331,58 | 6496,22 | 6451,83 |
| 0,000069 | 3587,57 | 3465,54 | 3587,17 | 3623,79 |
| 0,000046 | 1585,61 | 1551,92 | 1467,61 | 1541,05 |

Na obr. 7.4, 7.5 je znázorněn tlakový spád $\Delta p = f(Q)$ pro úhly otevření 20° a 60° a pro různé turbulentní modely ve srovnání s experimentem.

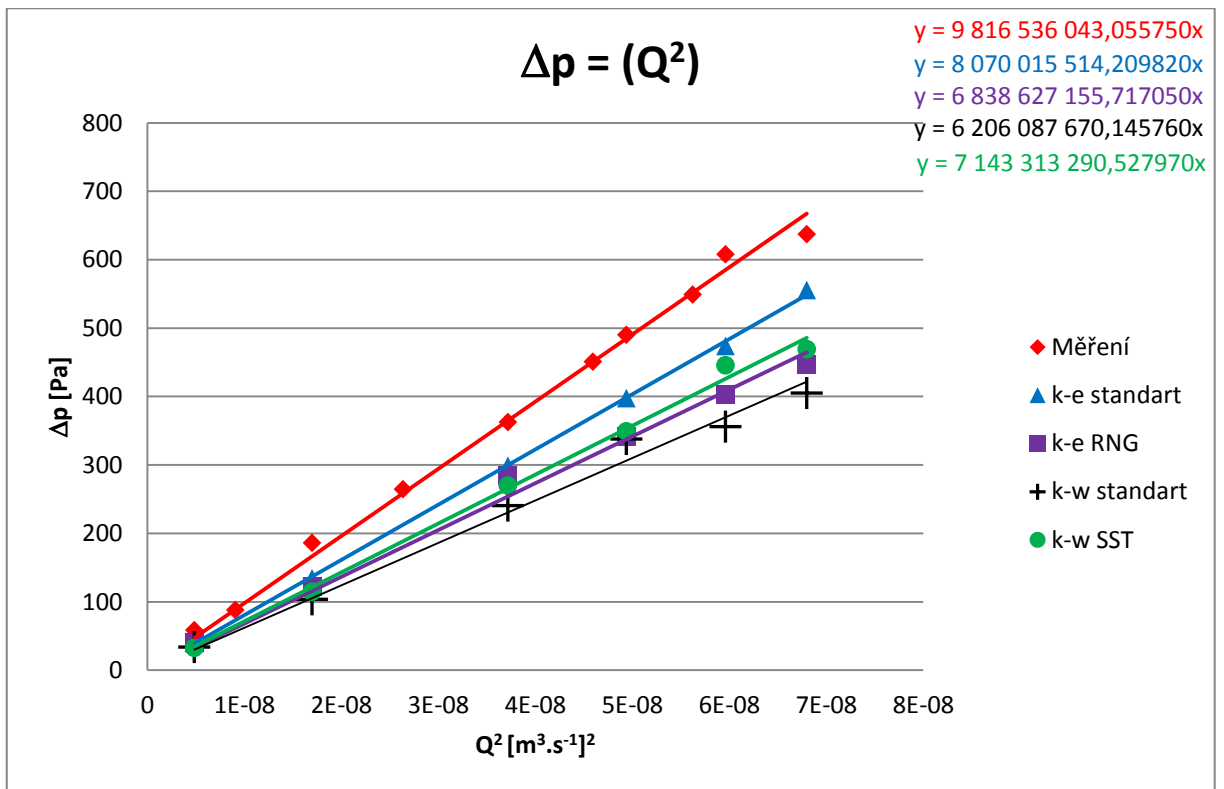
Grafické vyhodnocení ($\Delta p = f(Q)$, $\Delta p = (Q^2)$, $Q = (\Delta p^{1/2})$) pro 20° a 60° otevření ventilu jsou na obr. 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9. Pro otevření ventilu 0° a 40° jsou v příloze P.3, P.4, P.5, P.6.



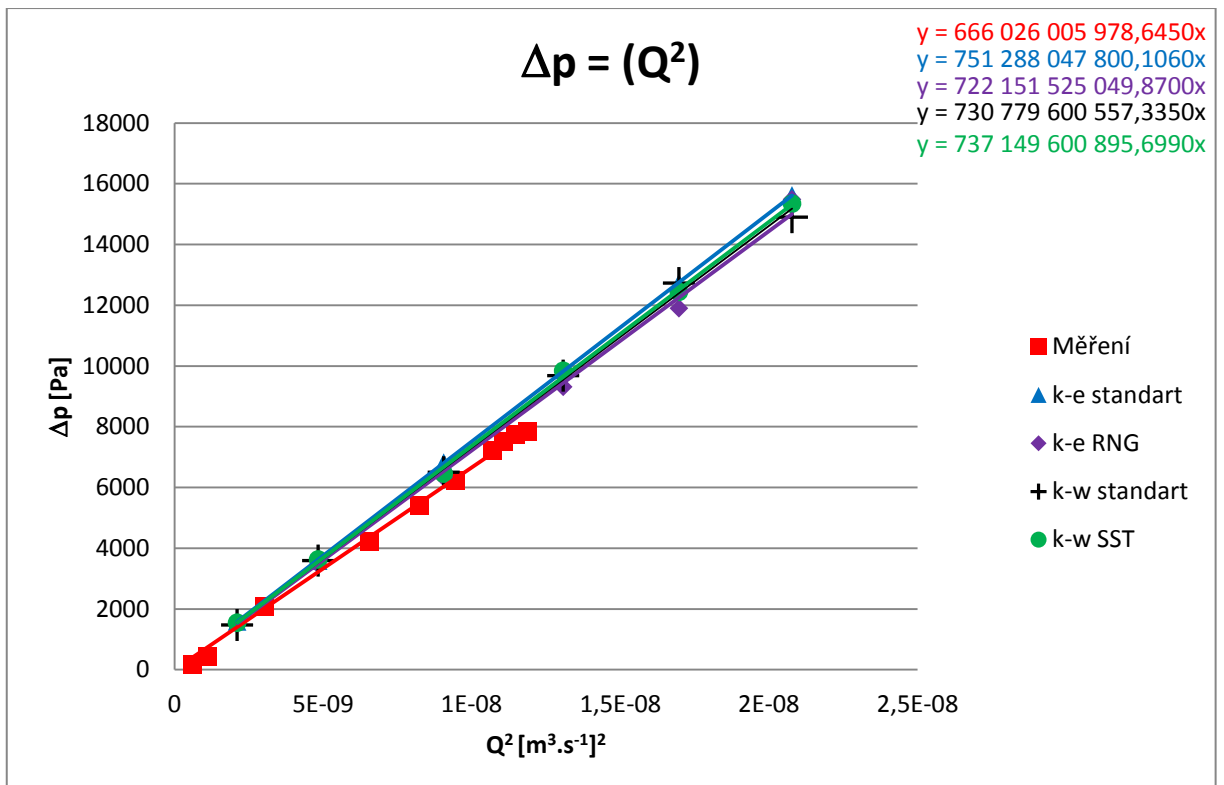
Obr. 7.4 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika pro 20° otevření ventilu



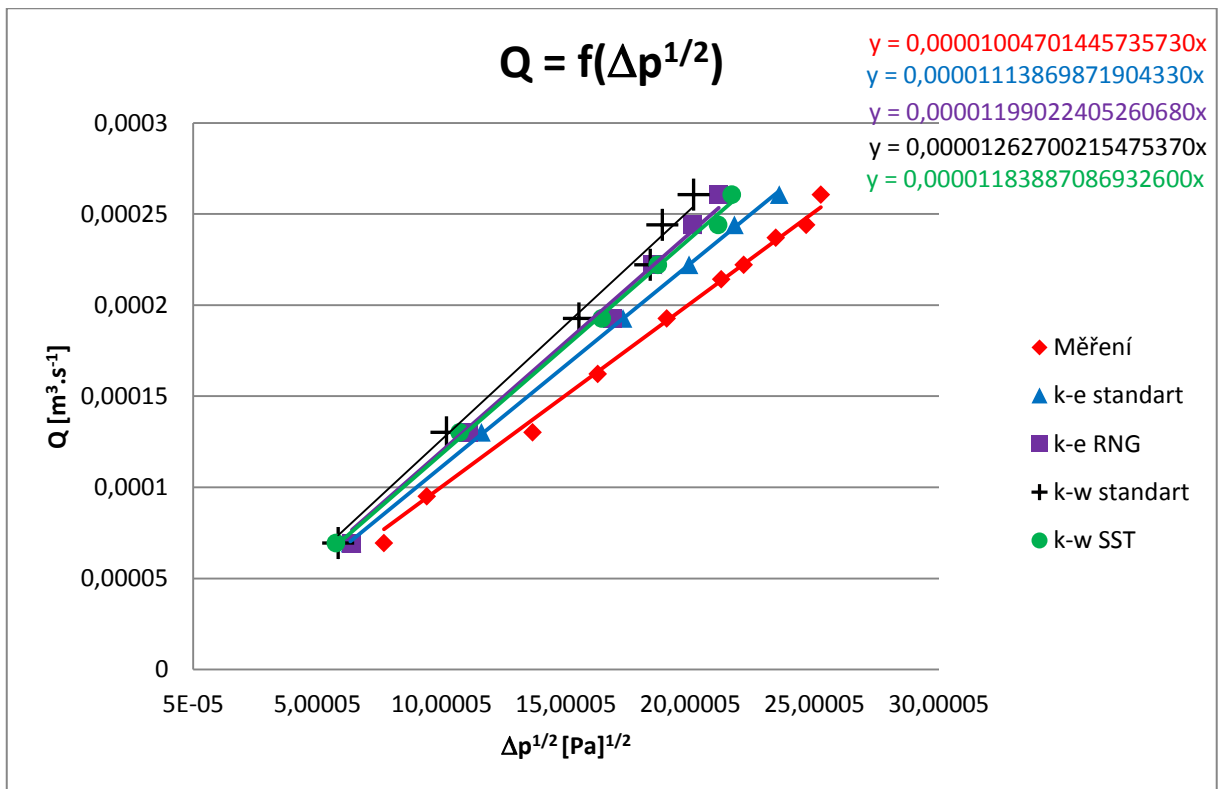
Obr. 7.5 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika pro 60° otevření ventilu



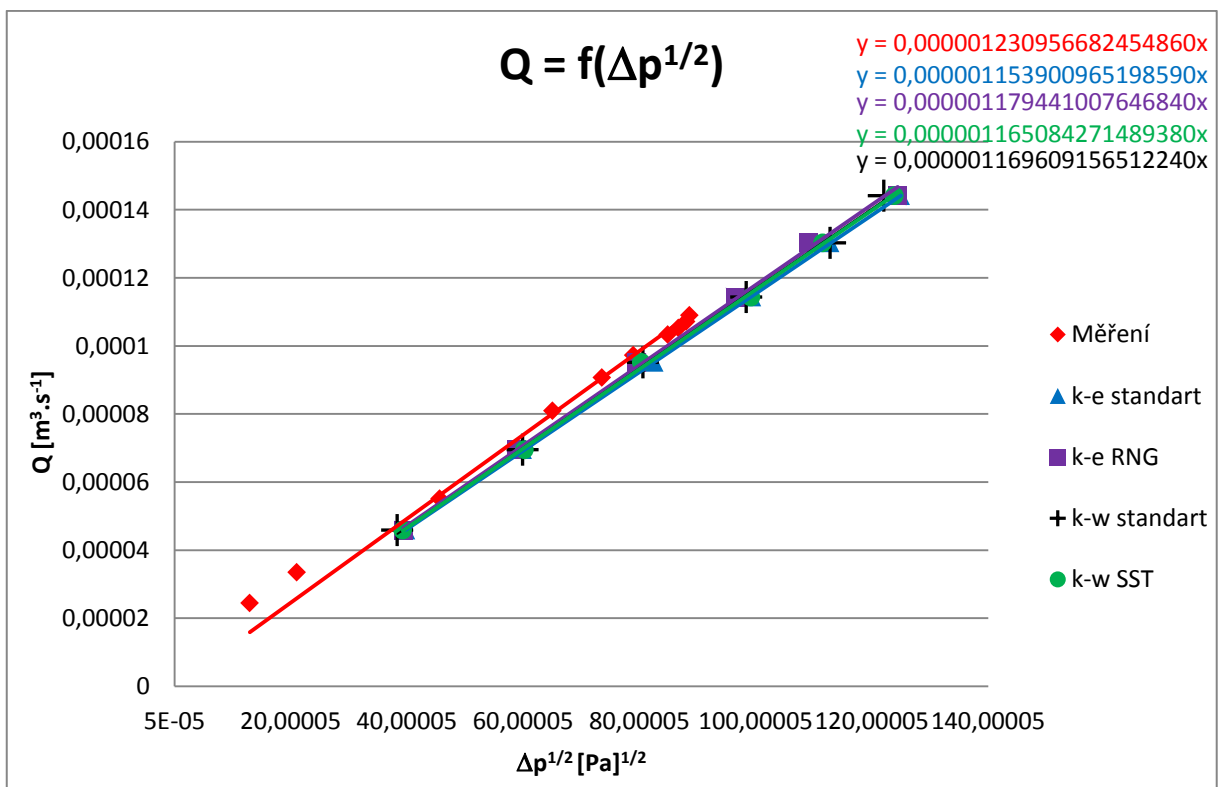
Obr. 7.6 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika pro 20° otevření



Obr. 7.7 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika pro 60° otevření



Obr. 7.8 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika pro 20° otevření



Obr. 7.9 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika pro 60° otevření

7.2.2 Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z výsledků matematického modelování dle výpočtu varianty I.

K výpočtu průtokového součinitele a průtočné plochy jsou využity totožné vztahy jako v kapitole 7.1.1.

Tab. 7.6 Vyhodnocení součinitelů a průtočné plochy

| | Model | K_i | ζ | μ | S [mm ²] |
|-----|---------------------|----------------------|-----------------|---------------|----------------------|
| 0° | k-e standart | 1833484592,86 | 0,3619 | 1,6623 | 314,16 |
| | k-e RNG | 1781313617,83 | 0,3516 | 1,6864 | |
| | k-w standart | 1407423926,46 | 0,2778 | 1,8972 | |
| | k-w SST | 1411197141,81 | 0,2786 | 1,8947 | |
| 20° | k-e standart | 8070015514,21 | 1,5930 | 0,7923 | 149,75 |
| | k-e RNG | 6838627155,72 | 1,3499 | 0,8607 | 160,34 |
| | k-w standart | 6206087670,15 | 1,2250 | 0,9035 | 149,61 |
| | k-w SST | 7143313290,53 | 1,4100 | 0,8421 | 139,64 |
| 40° | k-e standart | 81985184052 | 16,1832 | 0,2486 | 46,98 |
| | k-e RNG | 82237022402 | 16,2329 | 0,2482 | 46,24 |
| | k-w standart | 79193861143 | 15,6322 | 0,2529 | 41,88 |
| | k-w SST | 81138092940 | 16,0160 | 0,2499 | 41,43 |
| 60° | k-e standart | 7,51288E+11 | 148,2981 | 0,0821 | 15,52 |
| | k-e RNG | 7,22152E+11 | 142,5468 | 0,0838 | 15,60 |
| | k-w standart | 7,3078E+11 | 144,2499 | 0,0833 | 13,79 |
| | k-w SST | 7,3715E+11 | 145,5073 | 0,0829 | 13,75 |

7.2.3 Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy z výsledků matematického modelování dle výpočtu varianty II.

K výpočtu průtokového součinitele a průtočné plochy jsou využity totožné vztahy jako v kapitole 7.1.2.

Tab. 7.7 Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy

| | Model | K_{II} | μ | S [mm ²] |
|-----|--------------|--------------------|---------------|----------------------|
| 0° | k-e standart | 2,3006E-05 | 1,6375 | 314,16 |
| | k-e RNG | 2,32951E-05 | 1,6581 | |
| | k-w standart | 2,65137E-05 | 1,8872 | |
| | k-w SST | 2,64995E-05 | 1,8861 | |
| 20° | k-e standart | 1,11387E-05 | 0,7928 | 149,84 |
| | k-e RNG | 1,19902E-05 | 0,8534 | 158,98 |
| | k-w standart | 1,2627E-05 | 0,8987 | 148,82 |
| | k-w SST | 1,18389E-05 | 0,8426 | 139,72 |
| 40° | k-e standart | 3,49394E-06 | 0,2487 | 47,00 |
| | k-e RNG | 3,48454E-06 | 0,2480 | 46,20 |
| | k-w standart | 3,52399E-06 | 0,2508 | 41,53 |
| | k-w SST | 3,50824E-06 | 0,2497 | 41,40 |
| 60° | k-e standart | 1,1539E-06 | 0,0821 | 15,52 |
| | k-e RNG | 1,17944E-06 | 0,0839 | 15,64 |
| | k-w standart | 1,16961E-06 | 0,0832 | 13,78 |
| | k-w SST | 1,16508E-06 | 0,0829 | 13,75 |

7.3 Porovnání průtokových součinitelů a průtočných ploch z naměřených hodnot a výsledků matematického modelování

V tab. 7.8 a 7.9 jsou porovnány vypočtené hodnoty průtokových součinitelů μ a průtočných ploch S z matematického modelování pro všechny turbulentní modely a z experimentálního měření pro všechny úhly otevření ventilu.

Tab. 7.8 Porovnání výsledků naměřených a simulovaných hodnot varianty I.

| Varianta I. | | MODEL | μ | S [mm ²] | | MODEL | μ | S [mm ²] |
|-------------|----------------|-------|---------------|----------------------|-----|----------------|---------------|----------------------|
| 0° | Měření | | 1,0647 | | 40° | Měření | 0,2345 | 69,204 |
| | k-e standart | | 1,6623 | | | k-e standart | 0,2486 | 46,981 |
| | k-e RNG | | 1,6864 | 314,159 | | k-e RNG | 0,2482 | 46,237 |
| | k-w standart | | 1,8972 | | | k-w standart | 0,2529 | 41,881 |
| | k-w SST | | 1,8947 | | | k-w SST | 0,2499 | 41,432 |
| 20° | Měření | | 0,7184 | 211,974 | 60° | Měření | 0,0872 | 25,735 |
| | k-e standart | | 0,7923 | 149,745 | | k-e standart | 0,0821 | 15,520 |
| | k-e RNG | | 0,8607 | 160,338 | | k-e RNG | 0,0838 | 15,603 |
| | k-w standart | | 0,9035 | 149,607 | | k-w standart | 0,0833 | 13,787 |
| | k-w SST | | 0,8421 | 139,635 | | k-w SST | 0,0829 | 13,746 |

Tab. 7.9 Porovnání výsledků naměřených a simulovaných hodnot varianty II.

| Varianta II. | | MODEL | μ | S [mm ²] | | MODEL | μ | S [mm ²] |
|--------------|----------------|-------|---------------|----------------------|-----|----------------|---------------|----------------------|
| 0° | Měření | | 1,0489 | | 40° | Měření | 0,2364 | 70,800 |
| | k-e standart | | 1,6375 | | | k-e standart | 0,2487 | 47,000 |
| | k-e RNG | | 1,6581 | 314,159 | | k-e RNG | 0,2481 | 46,202 |
| | k-w standart | | 1,8872 | | | k-w standart | 0,2508 | 41,533 |
| | k-w SST | | 1,8861 | | | k-w SST | 0,2497 | 41,403 |
| 20° | Měření | | 0,7151 | 214,185 | 60° | Měření | 0,0876 | 26,242 |
| | k-e standart | | 0,7928 | 149,838 | | k-e standart | 0,0821 | 15,522 |
| | k-e RNG | | 0,8534 | 158,982 | | k-e RNG | 0,0839 | 15,639 |
| | k-w standart | | 0,8987 | 148,820 | | k-w standart | 0,0832 | 13,785 |
| | k-w SST | | 0,8426 | 139,718 | | k-w SST | 0,0829 | 13,750 |

8. GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ PROUDOVÝCH VELIČIN Z NUMERICKÉ SIMULACE

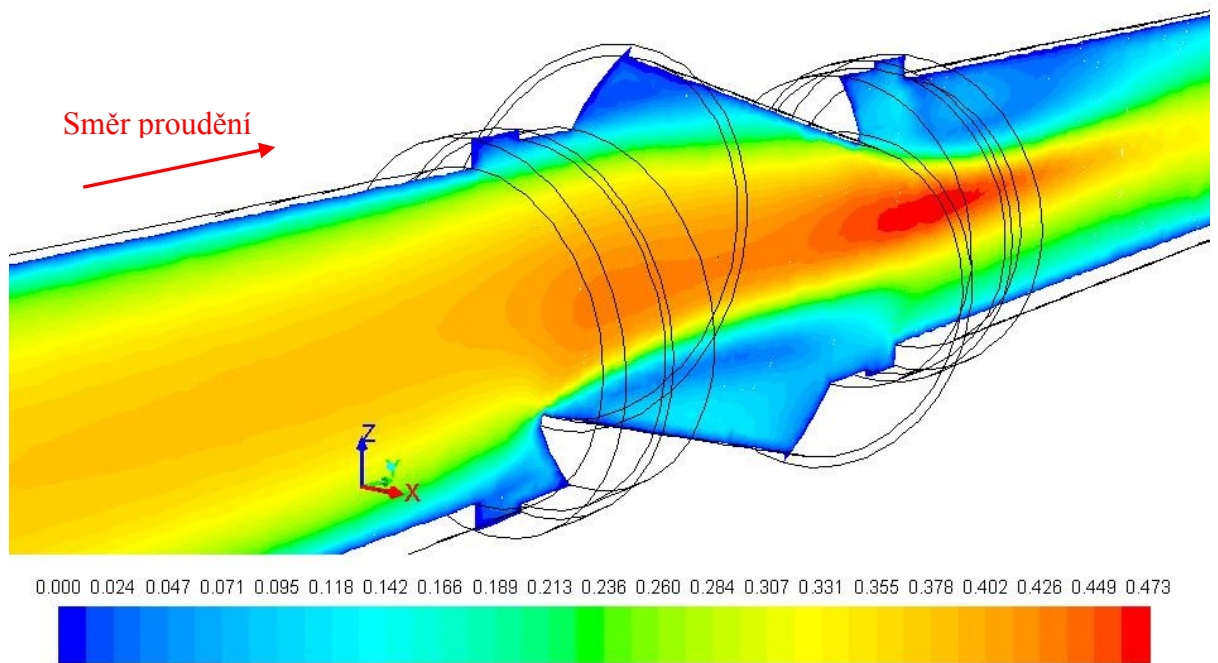
V této kapitole jsou vyhodnoceny proudová pole a proudové veličiny pro hodnoty otevření ventilu 20° a 60° a pro průtok $Q_{\max 20^\circ} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$, $Q_{\max 60^\circ} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$ a $Q_{\min 20^\circ} = 0,0000695 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$, $Q_{\min 60^\circ} = 0,000046 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$. Výsledky jsou vyhodnoceny v podélném řezu výpočtové oblasti. Vyhodnocení proudových polí a veličin pro otevření ventilu 0° a 40° je v příloze 3.

Z vyhodnocení vyplněných kontur velikosti rychlostí pole je viditelný průběh rychlosti ve zúžené oblasti. Rychlost na stěně potrubí je nulová, postupně do středu potrubí se zvyšuje a ve zúžení nabývá nejvyšších hodnot, viz obr. 8.1, 8.2, 8.3, 8.4.

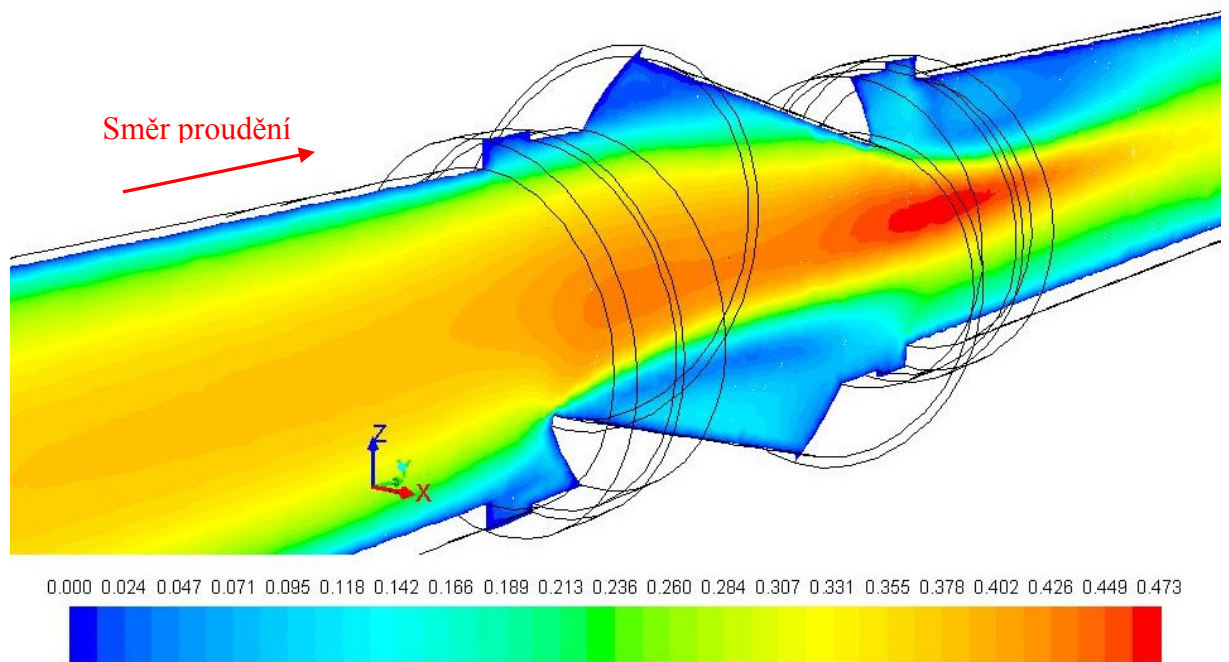
Z grafického zobrazení tlakového pole je viditelná změna statického tlaku před, uvnitř a za ventilem. Nejvyšší hodnota statického tlaku je v oblasti před ventilem. Naopak nejnižší hodnota statického tlaku je viditelná v oblasti za ventilem, kde hradící člen částečně zakrývá pokračující potrubí v téhle oblasti je tlak záporný což znamená tvořící se podtlak, viz obr. 8.5, 8.6, 8.7, 8.8.

Z grafického vyobrazení vektorového pole je zřejmý směr proudění kapaliny. Nejvyšší rychlost je v oblasti zúžení při výstupu kapaliny z ventilu, naopak nejnižší rychlost proudění je v oblastech, kde dochází k zavření, v těch místech dochází ke zpětnému proudění, které zvyšuje celkový tlakový spád ventilu, viz obr. 8.9, 8.10, 8.11, 8.12

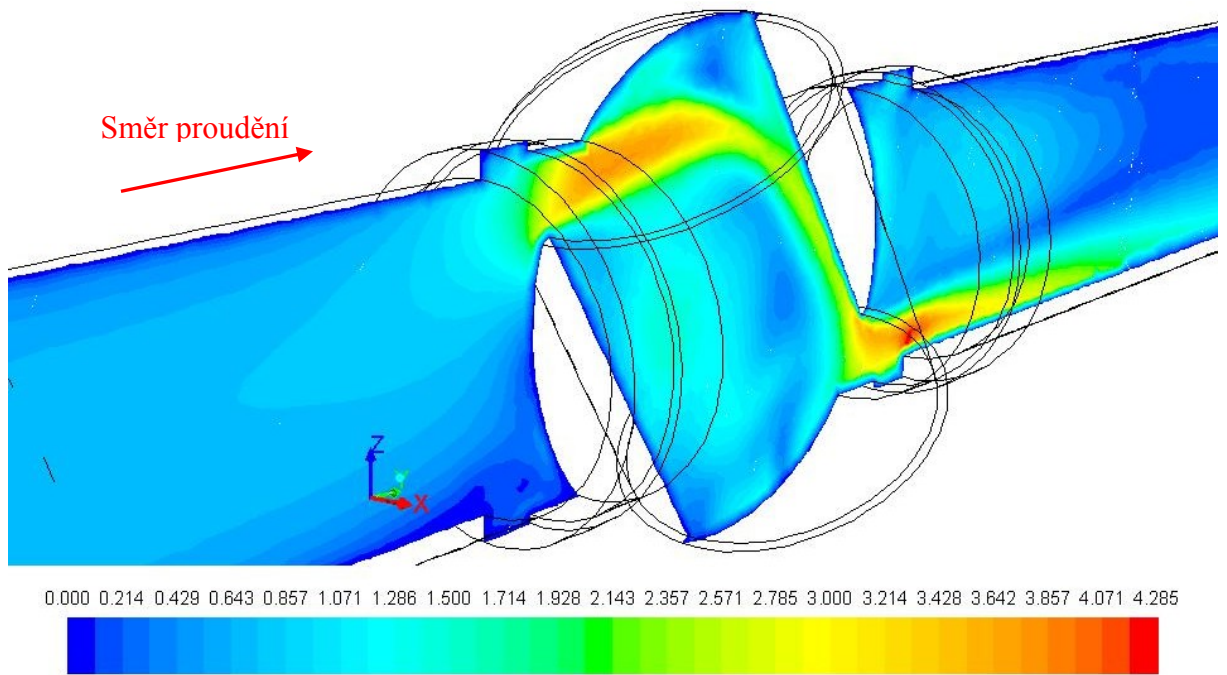
Další grafické vyhodnocení znázorňuje průběh statického tlaku podél výpočtové oblasti pro 20° a 60° otevření ventilu pro maximální průtok viz obr. 8.13, 8.14. Z obrázků je patrný postupný pokles tlaku po celé délce. Potrubí před a za ventilem, které má celkovou délku 900 mm vytváří v obvodu třecí ztráty na rovných úsecích, které mají za následek ztrátu tlaku, což je viditelné. U 60° otevření ventilu je viditelný výraznější tlakový spád v oblasti ventilu než u 20° otevření. Grafické vyhodnocení statického tlaku pro otevření ventilu 0° a 40° je vyobrazeno, viz P.21, P.22.



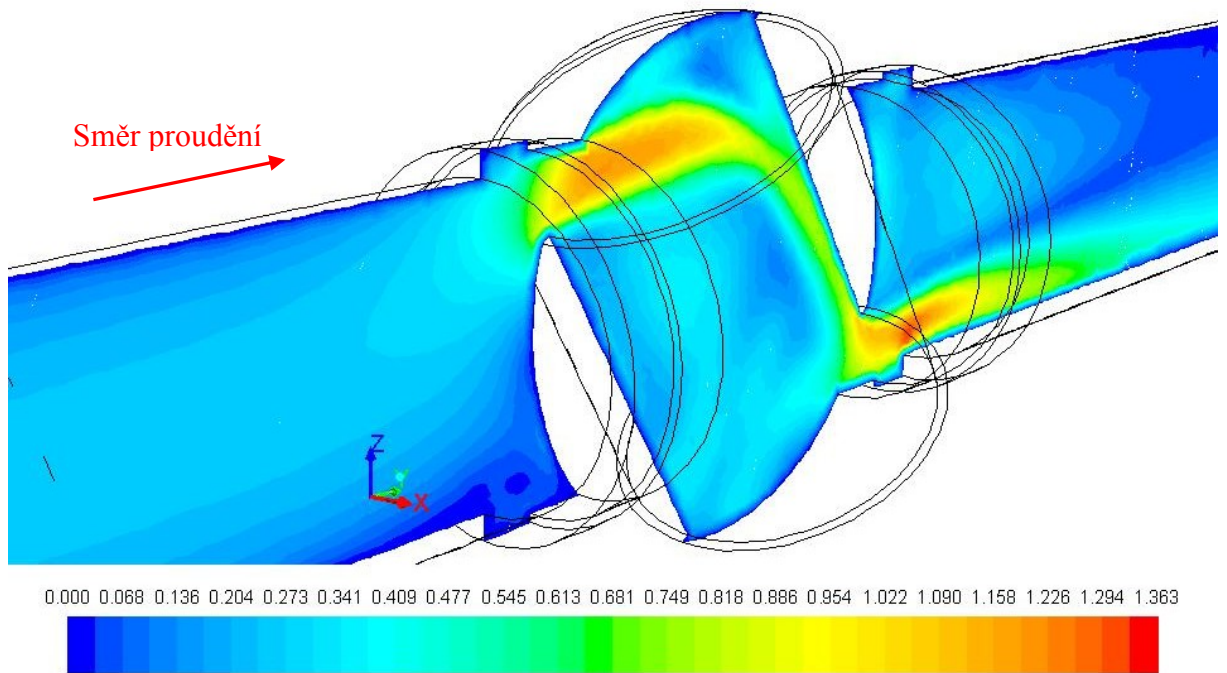
Obr. 8.1 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 20°- $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$



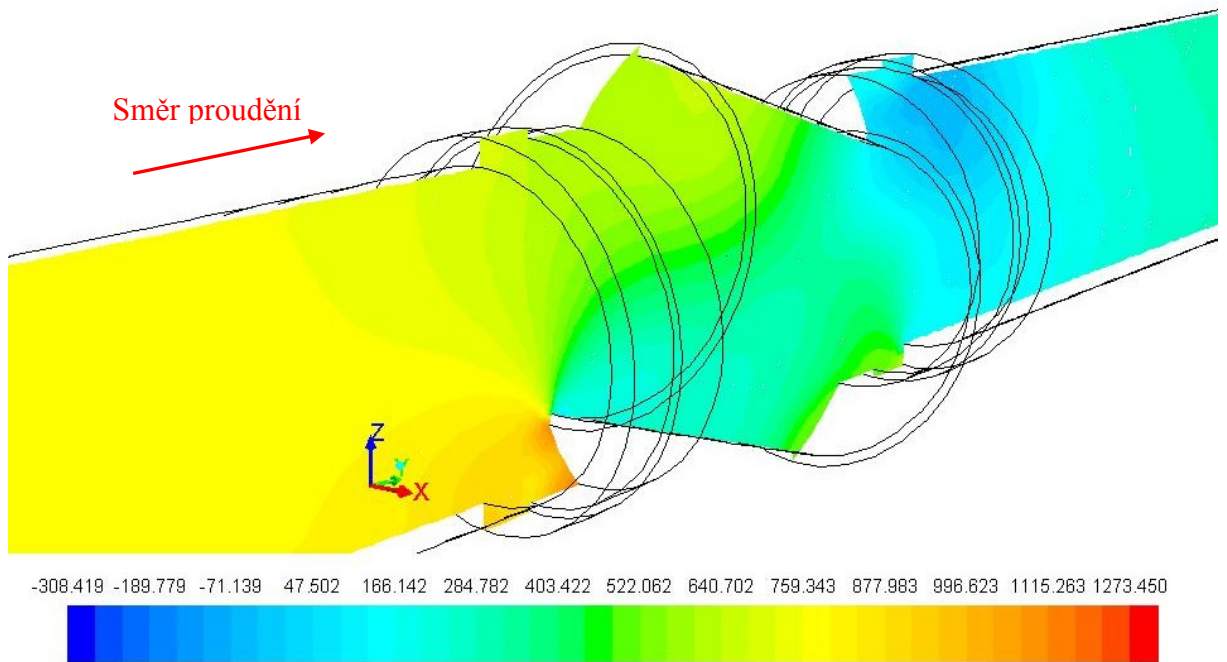
Obr. 8.2 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 20°- $Q_{\min} = 0,000069 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$



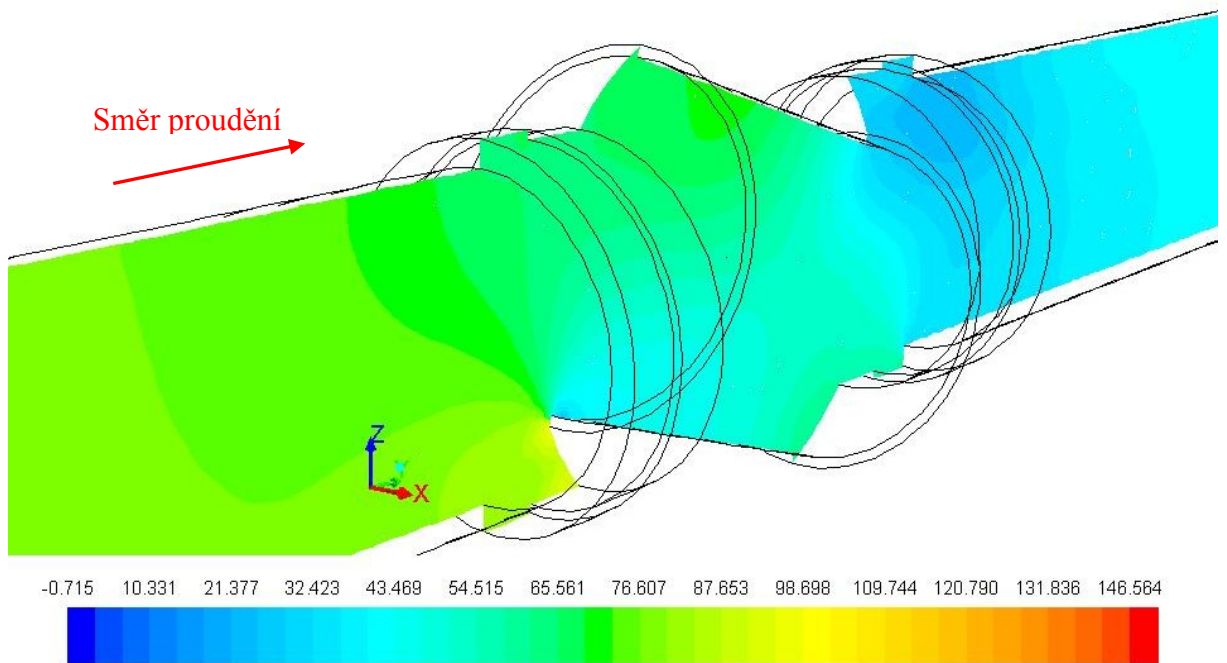
Obr. 8.3 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 60°- $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$



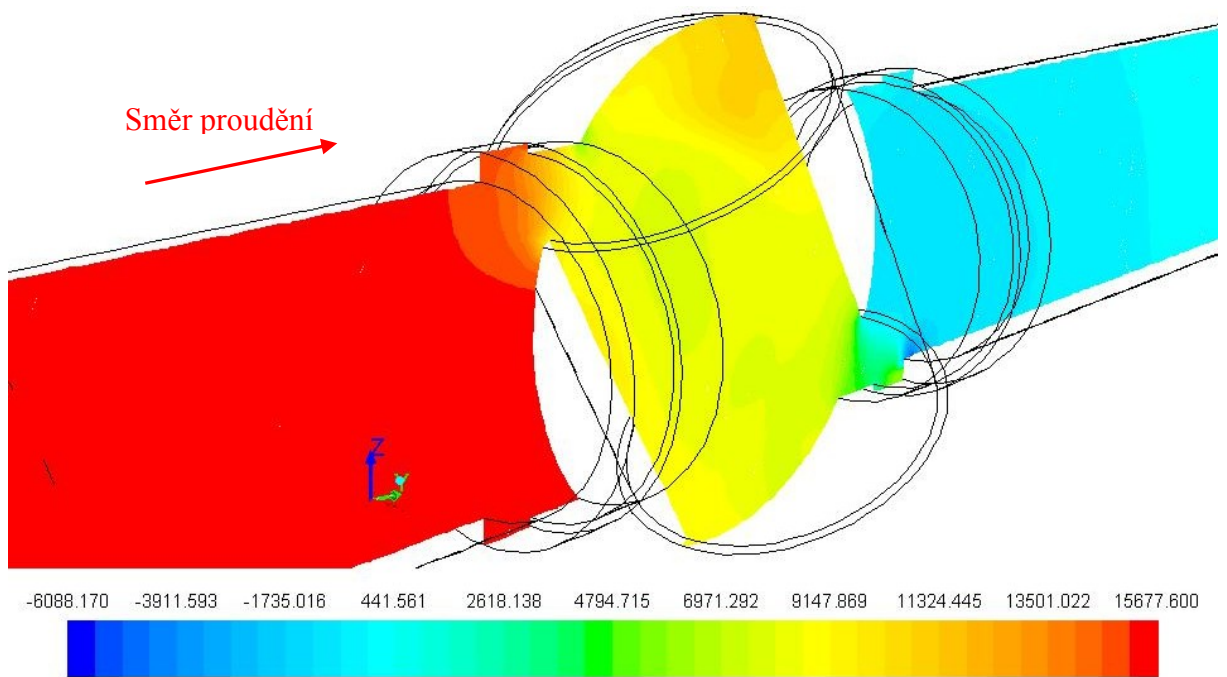
Obr. 8.4 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 60°- $Q_{\min} = 0,000046 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$



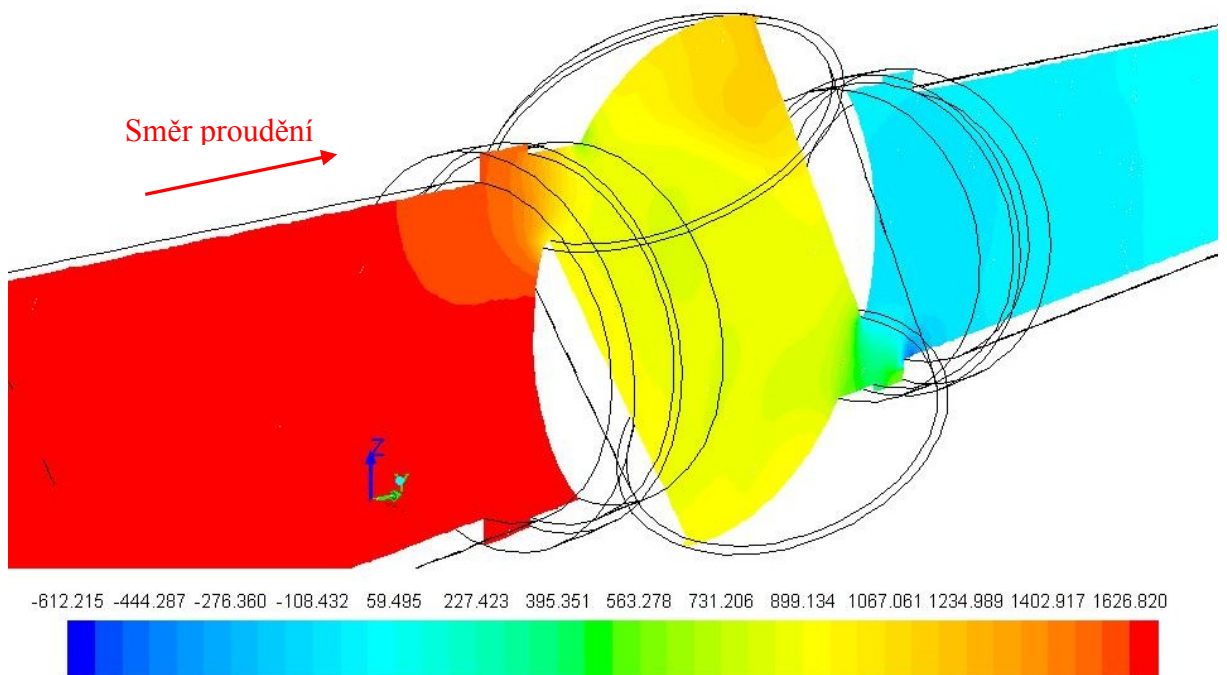
Obr. 8.5 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$



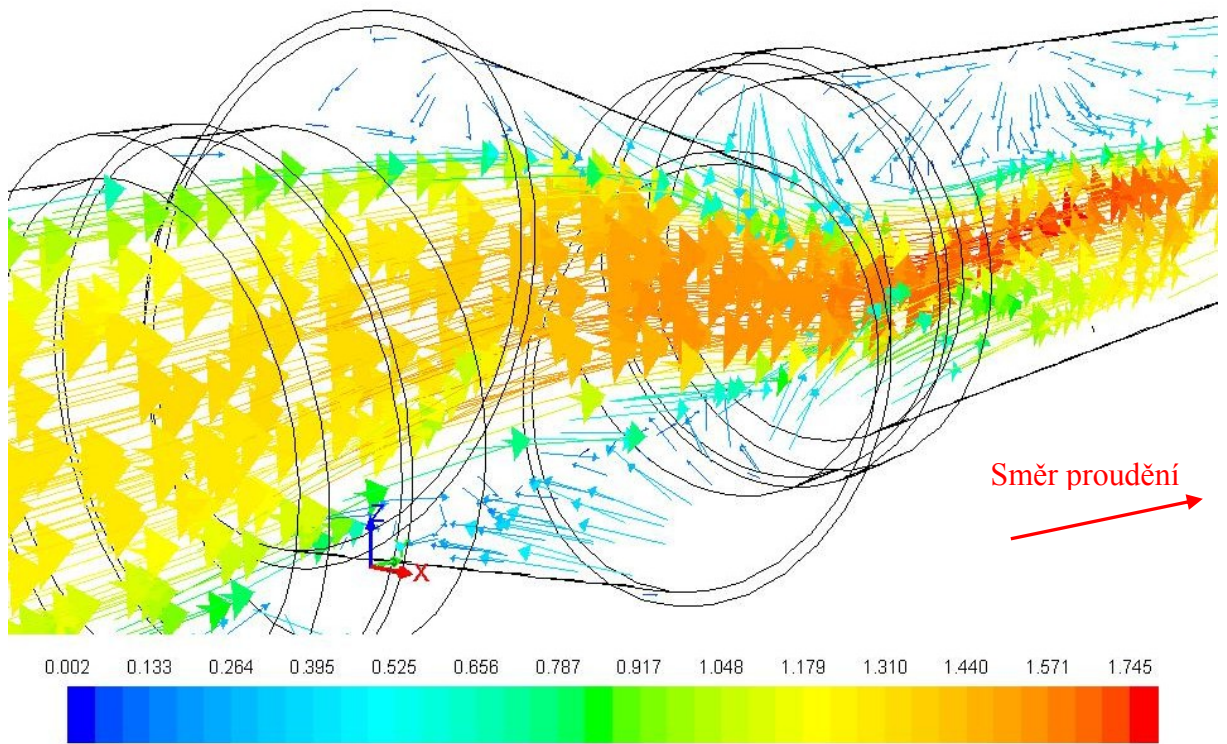
Obr. 8.6 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\min} = 0,000069 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$



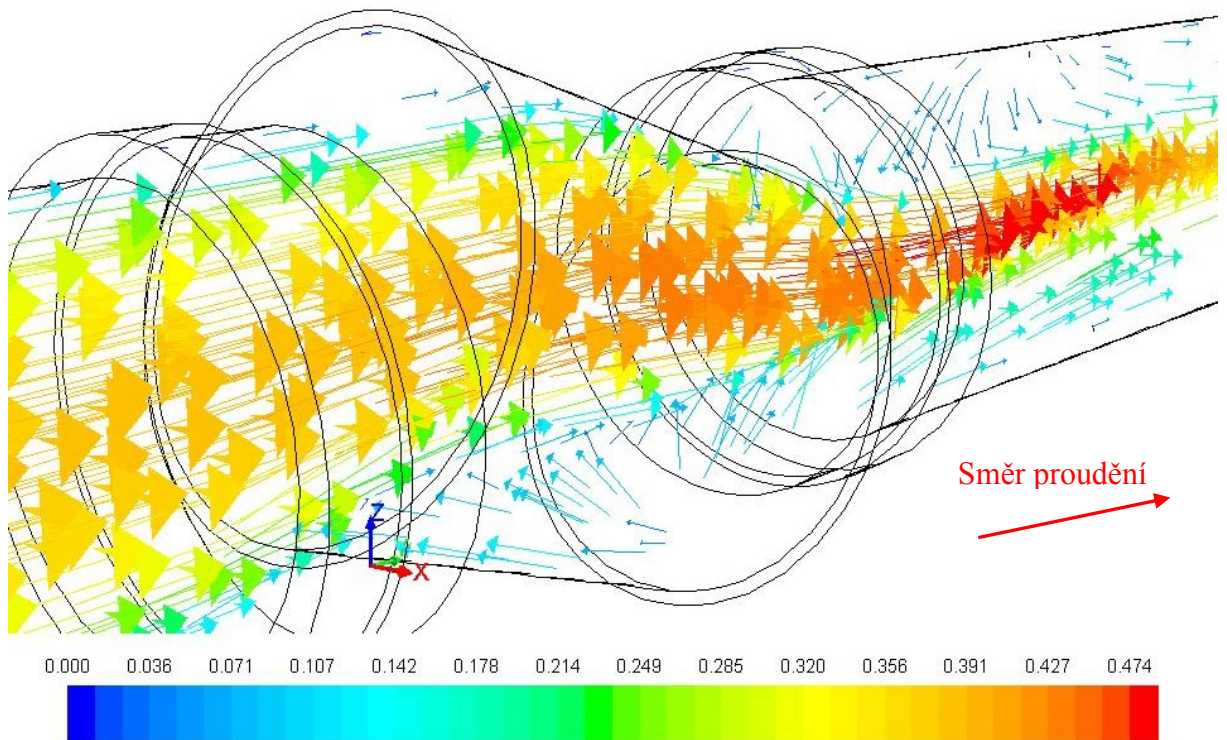
Obr. 8.7 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$



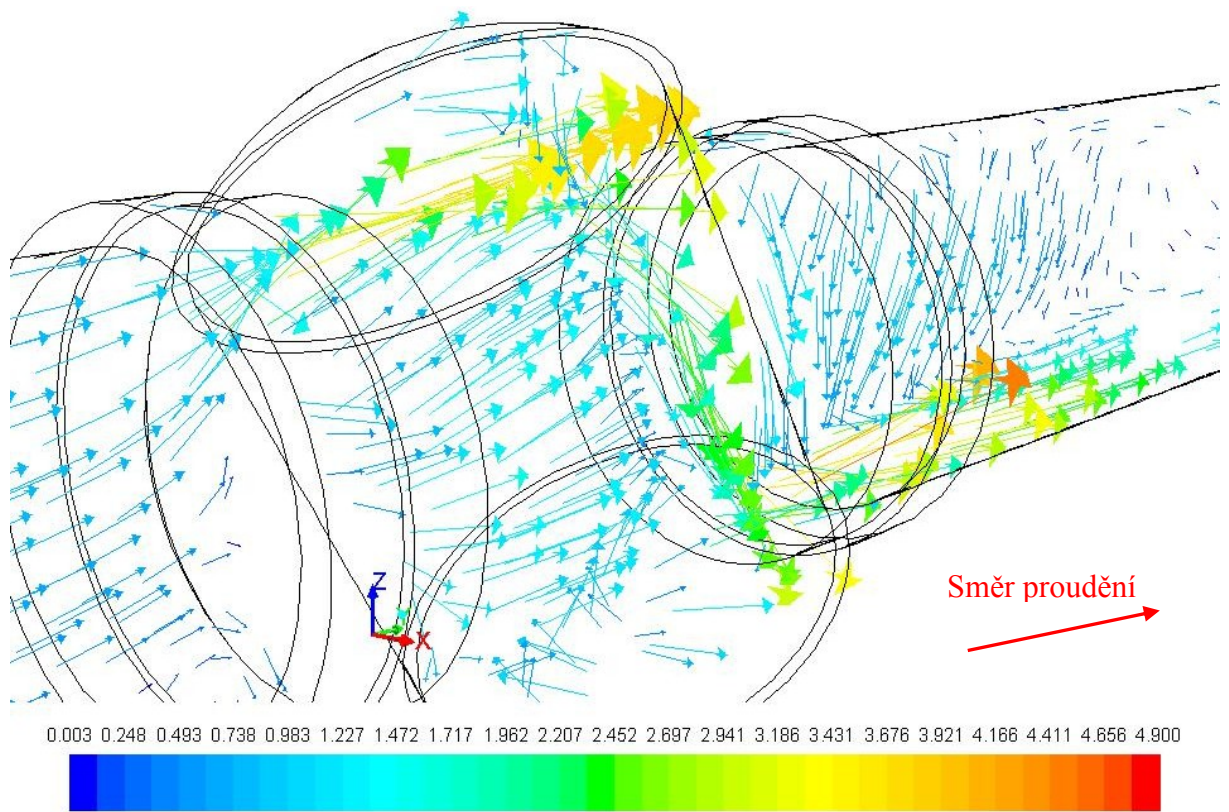
Obr. 8.8 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\min} = 0,000046 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$



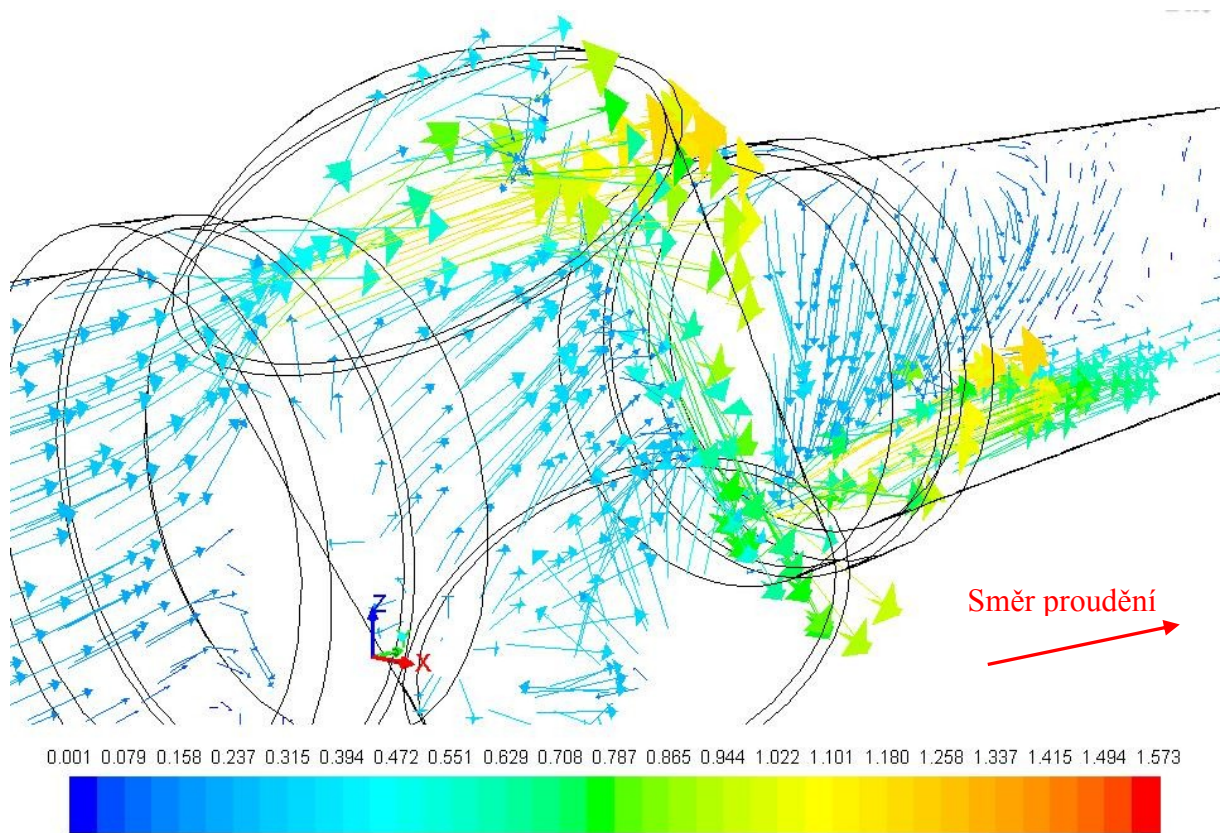
Obr. 8.9 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$



Obr. 8.10 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\min} = 0,000069 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$



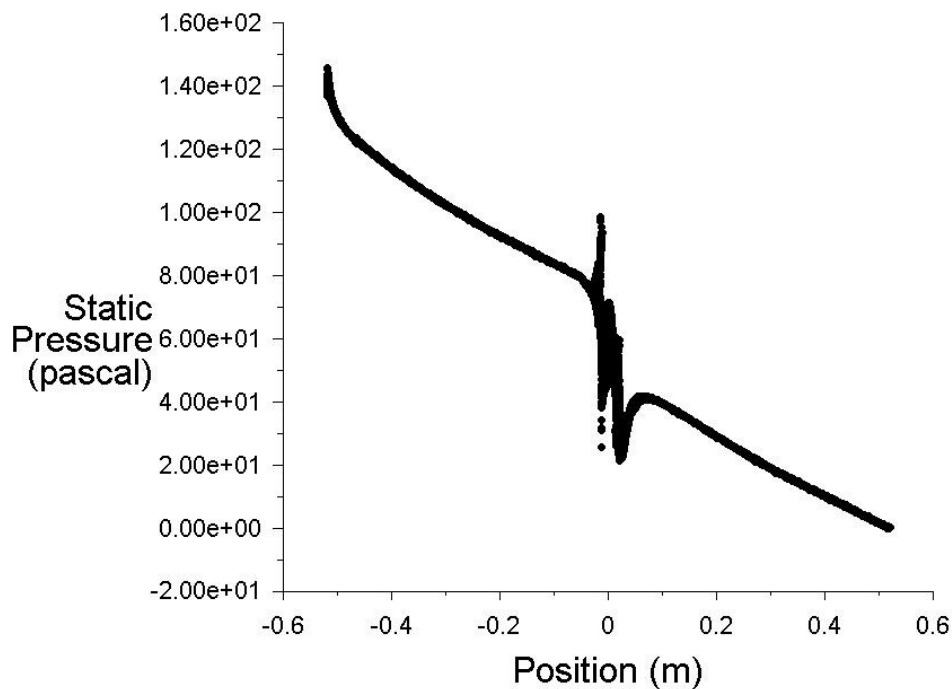
Obr. 8.11 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$



Obr. 8.12 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\min} = 0,000046 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

• podelny-rez-x

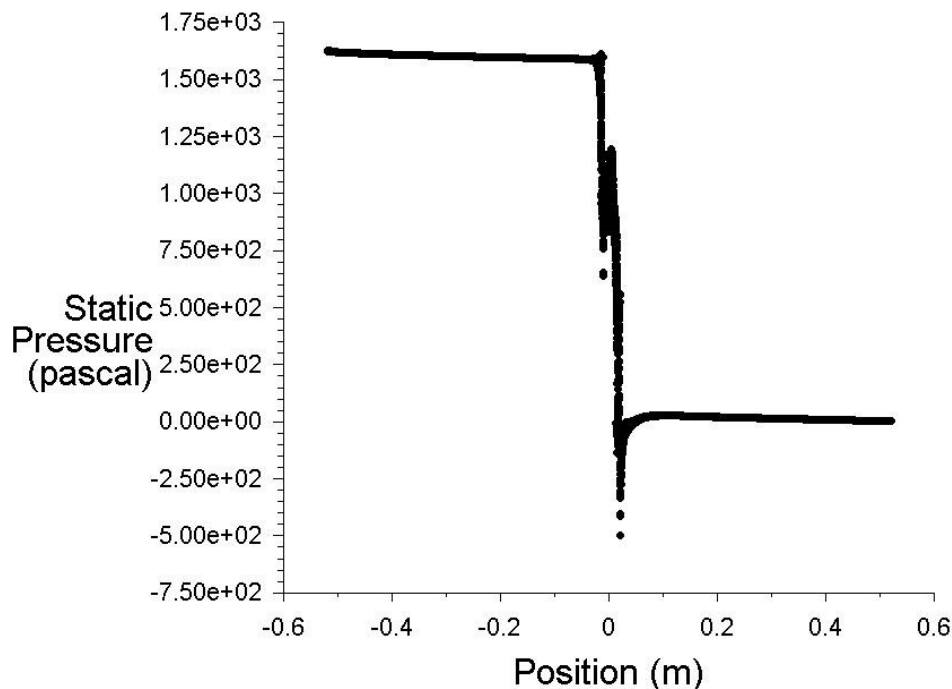
ANSYS
14.0



Obr. 8.13 Průběh statického tlaku po délce výpočtové oblasti pro uzavření 20° - $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

• podelny-rez-x

ANSYS
14.0



Obr. 8.14 Průběh statického tlaku po délce výpočtové oblasti pro uzavření 60° - $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

9. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo matematické modelování proudění v kulovém ventilu a následné vyhodnocení průtokového součinitele μ a průtočné plochy S . Vyhodnocené veličiny součinitele průtoku a průtočné plochy byly následně porovnány s naměřenými a vypočtenými hodnotami na experimentálním zařízení. Veškeré výpočty byly přehledně zpracovány do tabulek a grafů, které srovnávají hodnoty z měření a numerické simulace. Závěrečná část práce je zaměřena na grafické vyhodnocení proudových polí a veličin pomocí obrázků.

Měření bylo prováděno na experimentální zařízení v laboratoři pro čtyři různé úhly otevření kulového ventilu 0° , 20° , 40° a 60° a pro deset různých hodnot průtoků, které se regulovaly postupným uzavíráním ventilu na konci potrubí.

Numerická simulace proudění v kulovém ventilu byla prováděna pomocí softwaru ANSYS Fluent na předem vytvořené geometrii v softwaru Inventor. Geometrie byla vytvořena pro čtyři různé úhly otevření ventilu stejně jako bylo prováděno měření. Geometrie pro různé úhly otevření ventilu bylo nutné převést do softwaru ANSYS Design Modeler, kde byly definované vstupní a výstupní plochy a stěna. Dále byla potřeba vytvořit výpočetní síť, v softwaru ANSYS Meshing. V konečné fázi byl model převede do softwaru ANSYS Fluent, kde proběhlo nastavení výpočtového turbulentního modelu, volba protékajícího média, definování okrajových podmínek a samotný numerický výpočet.

Matematické modelování v každé poloze uzavření ventilu bylo prováděno pro čtyři různé turbulentní modely (k- ϵ Standart, k- ϵ RNG, k- ω Standart, k- ω SST) a pro šest různých hodnot průtoku pro každý model. Všechny hodnoty z numerické simulace jsou zpracovány v tabulkách a následně vykresleny v grafu.

Hodnoty průtokových součinitelů byly vyhodnoceny ze dvou různých vztahů (Bernoulliho rovnice a rovnice pro výpočet průtoku škrťacími armaturami) z důvodu ověření správnosti výpočtu. Každá z rovnic je definována jinak a proto bylo zapotřebí vykreslit dvě různé charakteristiky ($\Delta p = f(Q^2)$ a $\Delta p^{1/2} = f(Q)$), které byly proloženy lineární regresní křivkou a z rovnic lineární regrese vyhodnocena hodnota koeficientu K_I a K_{II} . Tento koeficient dále sloužil pro výpočet hodnoty průtokového součinitele z jednotlivých rovnic.

Největší odchylka průtokových součinitelů mezi měřením a matematickým modelováním je viditelná pro plné otevření ventilu. Je to z důvodů nepřesného svařování plastových potrubí. Vlivem tepelného lisování potrubí a kulového ventilu, dochází k vyosení a natlačení materiálu do oblasti proudícího média. Takto natlačený materiál vytváří v potrubí

překážku, do které naráží médium a tím výrazně ovlivňuje a navyšuje tlakový spád. Druhým důvodem rozdílu charakteristik pro plné otevření ventilu je vyšší numerická chyba při matematické simulaci pro nízká Reynoldsova čísla. Pro ostatní otevření ventilu (20°, 40° a 60°) tento rozdíl mezi měřením a numerickou simulací klesá. Dochází totiž k postupnému zakrývání natlačené překážky vlivem svařování hradicím členem (koulí) a tím postupnému snižování takto vzniklého odporu, proto se rozdíl mezi charakteristikami snižuje.

Závěr diplomové práce obsahuje vyhodnocení proudových polí a veličin z numerické simulace. Na těchto obrázcích jsou viditelné rozdíly rychlostí v rychlostních polích a vektorech rychlostí pro maximální a minimální průtok. Vliv tlakových ztrát v potrubí je viditelný z vyhodnocení tlakových polí a průběhů statického tlaku podél výpočtové oblasti. Výrazně větší tlakový spád v oblasti ventilu je viditelný u 60° otevření ventilu ve srovnání s 20°.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ODKAZŮ

- [1] ROČEK, Jaroslav. *Průmyslové armatury*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2002, 253 s. ISBN 80-733-3000-8.
- [2] KOZUBKOVÁ, Milada. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 130 s. ISBN 978-80-248-2043-9.
- [3] *Počítačová dynamika tekutin CFD* [online]. VSCHT [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/uchi/ped/cfd/cfd.metoda_konecnych_objemu.pdf. Přednáška. VSCHT.
- [4] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>. Skripta. Vysoká škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava.
- [5] *Modelování turbulentního proudění* [online]. Praha [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>. Skripta. České Vysoké Učení Technické.
- [6] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence modelování proudění - CFX*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2606-6.
- [8] KMÍNEK, Miloš. *Měření tlaku* [online]. Praha, 2006 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/FTOP08_Tlak.pdf
- [9] E-automatizace. *Deformační tlakoměry* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_deformacni_tlakomery.htm
- [10] E-automatizace. *Tlakoměry se silovým účinkem* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_se_silovym_ucinkem.htm
- [11] *Měření tlaku* [online]. Liberec [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/info_predmety/Aov/Vyuka/prednaska-kompresory_2cast.pdf. Přednáška. Technická Univerzita v Liberci.
- [12] ŠKORPÍK, Jiří. Škrčení plynů a par, *Transformační technologie*, 2006-01, [last updated 2013-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/skrцени-plynu-a-par.html>.

- [13] ORLÍKOVÁ, Soňa. *Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů*. In: [online]. Vysoké Učení Technické v Brně, 2001 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [14] MAKAL, Martin. *Zahradní kohoutky*. [online]. 2011 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.rezstromu.cz/news/vypomoc-pri-instalaci-automatickeho-zavlahoveho-systemu/>
- [15] Zařízení pro rozvod a úpravu stlačeného vzduchu. [online]. 2011 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.bea-cs.cz/produkty/ostatni-dodavany-sortiment/zarizeni-pro-rozvod-a-upravu-stlaceneho-vzduchu/>
- [16] Katalog firmy Tenza. In: *Ballomax* [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: www.tenza.cz/files/3281/ballomax_katalog.pdf
- [17] E-automatizace. *Kapalinové tlakoměry* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_kapalinove.htm
- [18] KOZUBKOVÁ, Milada, Pavel ŠTÁVA a Sylva DRÁBKOVÁ. *Matematické modely nestlačitelného a stlačitelného proudění: metoda konečných objemů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 1999, vi, 106 s. ISBN 80-707-8709-0.
- [19] MLYNAŘÍKOVÁ, Helena. *Matematické modelování turbulentního proudění* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2984/Mlynarikova_DP.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vimr Ph.D.
- [20] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování a simulace tekutinových mechanismů*. Ostrava, 2009. Skripta. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava.

11. SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 2.1 Kulový ventil | 12 |
| Obr. 2.2 Řez ventilem a působení pracovního tlaku na kouli | 13 |
| Obr. 2.3 Kulový ventil s plovoucím sedlem [1] | 13 |
| Obr. 2.4 Aplikace ventilu zahradního zavlažování [14] | 14 |
| Obr. 2.5 Aplikace ventilu při rozvodu stlačeného vzduchu [15] | 14 |
| Obr. 2.6 Kulový ventil DN 125 - 500 [16] | 15 |
| Obr. 3.1 U - trubice [17] | 16 |
| Obr. 3.2 Tlakoměr se sklonným ramenem [17] | 16 |
| Obr. 3.3 Nádobkový tlakoměr [17] | 16 |
| Obr. 3.4 Obrácená U - trubice | 16 |
| Obr. 3.5 Druhy tlakoměrných prvků a) Bourdonova trubice, b) membrána, c) krabice, d) vlnovec [9] | 17 |
| Obr. 3.6 Trubicový tlakoměr [9] | 17 |
| Obr. 3.7 Membránový tlakoměr [9] | 17 |
| Obr. 3.8 Vlnovcový tlakoměr [9] | 17 |
| Obr. 3.9 Pístový tlakoměr [10] | 18 |
| Obr. 3.10 Zvonový tlakoměr [10] | 18 |
| Obr. 3.11 Odporový tenzometr [11] | 18 |
| Obr. 3.12 Kovové odporové tenzometry [11] | 18 |
| Obr. 3.13 Polovodičové tenzometry [11] | 18 |
| Obr. 3.14 Clona [12] | 19 |
| Obr. 3.15 Venturiho trubice [13] | 20 |
| Obr. 3.16 dýza [13] | 20 |
| Obr. 3.17 Cejchovní křivka clony | 21 |
| Obr. 3.18 Zkušební měřící obvod | 21 |
| Obr. 3.19 Vykreslení $\Delta p - Q$ charakteristiky | 22 |
| Obr. 4.1 Rozdělení oblasti na malé objemy [3] | 24 |
| Obr. 5.1 Části ventilu | 28 |
| Obr. 5.2 Otevření 0° | 29 |
| Obr. 5.3 Otevření 20° | 29 |
| Obr. 5.4 Otevření 40° | 29 |
| Obr. 5.5 Otevření 60° | 29 |
| Obr. 5.6 Typy elementů sítě výpočetního softwaru ANSYS Meshing | 30 |

| | |
|--|----|
| Obr. 5.7 Definování velikosti buňky | 30 |
| Obr. 5.8 Vzhled základní sítě geometrie..... | 31 |
| Obr. 5.9 Rozměry geometrie ventilu | 31 |
| Obr. 5.10 Zhuštěná síť v oblasti ventilu | 32 |
| Obr. 5.11 Vytvoření vstupní a výstupní okrajové podmínky | 32 |
| Obr. 7.1 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika naměřených hodnot | 38 |
| Obr. 7.2 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika..... | 38 |
| Obr. 7.3 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika..... | 39 |
| Obr. 7.4 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika pro 20° otevření ventilu..... | 43 |
| Obr. 7.5 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika pro 60° otevření ventilu..... | 43 |
| Obr. 7.6 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika pro 20° otevření..... | 44 |
| Obr. 7.7 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika pro 60° otevření..... | 44 |
| Obr. 7.8 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika pro 20° otevření | 45 |
| Obr. 7.9 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika pro 60° otevření | 45 |
| Obr. 8.1 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 20°- $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 50 |
| Obr. 8.2 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 20°- $Q_{\min} = 0,000069 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 50 |
| Obr. 8.3 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 60°- $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 51 |
| Obr. 8.4 Kontury velikosti rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu 60°- $Q_{\min} = 0,000046 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 51 |
| Obr. 8.5 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 52 |
| Obr. 8.6 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\min} = 0,000069 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 52 |
| Obr. 8.7 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 53 |
| Obr. 8.8 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\min} = 0,000046 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 53 |
| Obr. 8.9 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 54 |
| Obr. 8.10 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 20° - $Q_{\min} = 0,000069 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 54 |
| Obr. 8.11 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 55 |
| Obr. 8.12 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu 60° - $Q_{\min} = 0,000046 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 55 |
| Obr. 8.13 Průběh statického tlaku po délce výpočtové oblasti pro uzavření 20° - $Q_{\max} = 0,000261 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 56 |
| Obr. 8.14 Průběh statického tlaku po délce výpočtové oblasti pro uzavření 60° - $Q_{\max} = 0,000144 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | 56 |

12. SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 7.1 Hodnoty průtoků a tlakových spádů | 37 |
| Tab. 7.2 Vyhodnocení součinitelů (ζ , μ) a průtočné plochy (S)..... | 39 |
| Tab. 7.3 Vyhodnocení součinitele (μ) a průtočné plochy (S)..... | 40 |
| Tab. 7.4 Hodnoty Δp získané z matematického modelování pro 20° otevření ventilu | 42 |
| Tab. 7.5 Hodnoty Δp získané z matematického modelování pro 60° otevření ventilu | 42 |
| Tab. 7.6 Vyhodnocení součinitelů a průtočné plochy | 46 |
| Tab. 7.8 Vyhodnocení průtokového součinitele a průtočné plochy | 47 |
| Tab. 7.9 Porovnání výsledků naměřených a simulovaných hodnot varianty I. | 48 |
| Tab. 7.10 Porovnání výsledků naměřených a simulovaných hodnot varianty II..... | 48 |

13. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Tabulky hodnot matematického modelování

| | |
|---|----|
| P. 1 Hodnoty Δp získané z matematického modelování pro 0° otevření ventilu..... | 65 |
| P. 2 Hodnoty Δp získané z matematického modelování pro 40° otevření ventilu..... | 65 |

Příloha 2. Grafické zpracování naměřených hodnot

| | |
|--|----|
| P. 3 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika pro 0° otevření ventilu | 66 |
| P. 4 $\Delta p = f(Q)$ charakteristika pro 40° otevření ventilu | 66 |
| P. 5 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika pro 0° otevření..... | 67 |
| P. 6 $\Delta p = f(Q^2)$ charakteristika pro 40° otevření..... | 67 |
| P. 7 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika pro 0° otevření | 68 |
| P. 8 $Q = f(\Delta p^{1/2})$ charakteristika pro 40° otevření | 68 |

Příloha 3. Vyhodnocení proudových polí a veličin

| | |
|---|----|
| P. 9 Kontury velikost rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu $0^\circ - Q_{\max} = 0,000267$ [m ³ .s ⁻¹] | 69 |
| P. 10 Kontury velikost rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu $0^\circ - Q_{\min} = 0,0000952$ [m ³ .s ⁻¹] .. | 69 |
| P. 11 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu $0^\circ - Q_{\max} = 0,000267$ [m ³ .s ⁻¹] | 70 |
| P. 12 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu $0^\circ - Q_{\max} = 0,0000952$ [m ³ .s ⁻¹] | 70 |
| P. 13 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu $0^\circ - Q_{\max} = 0,000267$ [m ³ .s ⁻¹] | 71 |
| P. 14 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu $0^\circ - Q_{\min} = 0,0000952$ [m ³ .s ⁻¹] | 71 |
| P. 15 Kontury velikost rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu $40^\circ - Q_{\max} = 0,000241$ [m ³ .s ⁻¹] .. | 72 |
| P. 16 Kontury velikost rychlosti v [m/s] pro uzavření ventilu $40^\circ - Q_{\min} = 0,0000952$ [m ³ .s ⁻¹] .. | 72 |
| P. 17 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu $40^\circ - Q_{\max} = 0,000241$ [m ³ .s ⁻¹] | 73 |
| P. 18 Tlakové pole p [Pa] pro uzavření ventilu $40^\circ - Q_{\min} = 0,0000952$ [m ³ .s ⁻¹] | 73 |
| P. 19 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu $40^\circ - Q_{\max} = 0,000241$ [m ³ .s ⁻¹] | 74 |
| P. 20 Vektory rychlostí v [m/s] pro uzavření ventilu $40^\circ - Q_{\min} = 0,0000952$ [m ³ .s ⁻¹] | 74 |

Příloha 4. Průběh statického tlaku po celé délce potrubí

| | |
|---|----|
| P. 21 Průběh statického tlaku v celé délce modelovaného potrubí pro uzavření 0° | 75 |
| P. 22 Průběh statického tlaku v celé délce modelovaného potrubí pro uzavření 40° | 75 |