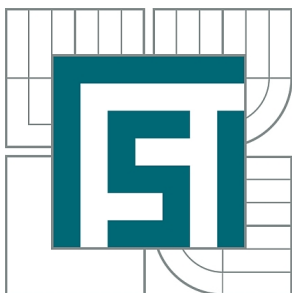


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

OPTIMALIZACE ZJEDNODUŠENÉHO OKRUŽNÍHO POTRUBÍ PRO 5-TI DÝZOVOU VERTIKÁLNÍ PELTONOVU TURBÍNU.

OPTIMIZING OF SIMPLYFEID CIRCULAR DISTRIBUTIONAL PIPE OF THE VERTICAL PELTON
TURBINE WITH 5 NOZZLES.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ROBIN HALABRIN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠTIGLER, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Robin Halabrin

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

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

Optimalizace zjednodušeného okružního potrubí pro 5-ti dýzovou vertikální Peltonovu turbínu.

v anglickém jazyce:

Optimizing of Simplyfeid Circular Distributional Pipe of the Vertical Pelton Turbine with 5 Nozzles.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o optimalizaci zjednodušeného okružního potrubí pro 5-ti dýzovou vertikální Peltonovu jako alternativu ke klasickému profilu okružního potrubí podle zadaných požadavků. Toto téma navazuje na předchozí obhájenou diplomovou práci.

Smyslem optimalizace je nalézt vhodný tvar okružního potrubí z hlediska hydraulických ztrát a z hlediska rovnoměrného rozložení průtoků jednotlivými dýzami při minimalizaci nákladů na výrobu.

Cíle diplomové práce:

V rámci práce bude provedeno numerické modelování proudění ve zjednodušeném okružním potrubí, minimálně pro dvě nové geometrie.

Základní návrhové parametry okružního potrubí budou převzaty z předchozí diplomové práce tak, aby bylo možné provést srovnání.

Výpočty nových geometrií budou srovnány s výpočty, které byly provedeny v předchozí diplomové práci současně budou porovnány, alespoň přibližně náklady na výrobu jednotlivých variant.

Seznam odborné literatury:

Nechleba, M. Vodní turbíny a jejich příslušenství. SNTL 1962, Praha

Manuál software Fluent

Podklady od firmy Mavel

Předchozí diplomové a bakalářské práce zabývající se touto problematikou.

Internet

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá hydraulickou optimalizací přívodního potrubí pro 5-ti dýzovou Peltonovu turbínu pomocí CFD. Práce navazuje na předchozí diplomovou práci, která se zabývala možnostmi zjednodušení stávajícího okružního potrubí. Několik zjednodušených variant okružního potrubí již bylo spočítáno a dosažené výsledky ukázaly, jakým směrem by bylo dobré se ubírat. Zjednodušené okružní potrubí vychází z daných rozměrů a zachovává si stejný postup vyhodnocení pro možnost porovnání dosažených výsledků. Byly vytvořeny dvě nové geometrie okružního potrubí, které byly dále modifikovány tak, aby se dosáhlo optimálního rozložení průtoku v jednotlivých dýzách. Dalším porovnávacím kritériem je statický tlak a Coriolisovo číslo v řezech potrubí. V neposlední řadě je také zpracován zjednodušený ekonomický rozbor pro vybrané varianty potrubí, na jehož základě je možno vidět náročnost výroby okružního potrubí.

Klíčová slova: Peltonova turbína, okružní potrubí, CFD

ABSTRACT

This diploma thesis deals with hydraulic optimization of distribution pipeline for 5 nozzle Pelton's turbine by using CFD. The thesis is a follow-up to a previous diploma thesis which deals with the possibilities to simplify existing distribution pipeline. A few simplified versions of distribution pipelines were solved and the results show which way we should proceed towards the right solution. The simplified distribution pipeline arises from given parameters and retains the same procedure of evaluation to give us the opportunity of comparing achieved results. Two new geometries of distribution pipeline were created. They were then modified to achieve optimal distribution of discharge in each nozzle. Other criteria used for comparison were static pressure and Coriolis' number in specific slices inside pipeline. Last but not least a simple economical analysis for selected version of distribution pipeline was carried out on the basis of which we can see the manufacturing costs of the pipeline.

Key words: Pelton turbine, distribution pipe, CFD

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALABRIN, R. Optimalizace zjednodušeného okružního potrubí pro 5-ti dýzovou vertikální Peltonovu turbínu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 64 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

PROHLÁŠNÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Optimalizace zjednodušeného okružního potrubí pro 5-ti dýzovou vertikální Peltonovu turbínu vypracoval samostatně s použitím uvedené odborné literatury.

Datum

.....
příjmení a jméno

PODĚKOVÁNÍ

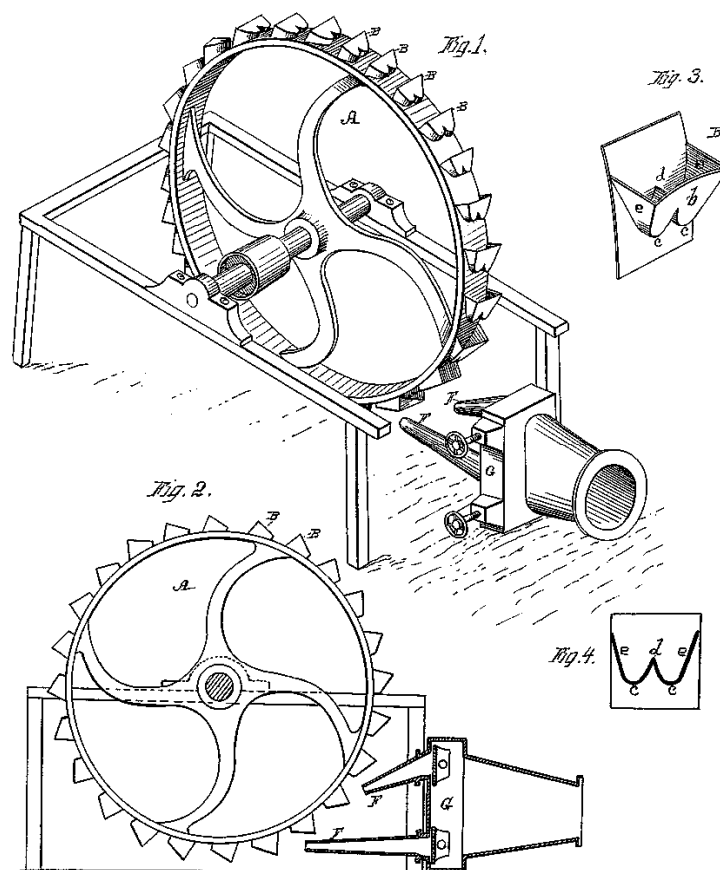
Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslavu Štiglerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

1.	ÚVOD	- 10 -
2.	CÍL.....	- 12 -
3.	ZÁKLADNÍ PARAMETRY	- 12 -
4.	NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ.....	- 14 -
4.1	MODEL OKRUŽNÍHO POTRUBÍ.....	- 14 -
4.2	NASTAVENÍ VÝPOČTŮ	- 15 -
4.3	VYHODNOCENÍ VÝPOČTŮ	- 16 -
4.4	ORIGINÁLNÍ POTRUBÍ	- 19 -
4.5	VARIANTA 1	- 21 -
4.6	VARIANTA 1A	- 24 -
4.7	VARIANTA 1B	- 27 -
4.8	VARIANTA 2	- 29 -
4.9	VARIANTA 2A	- 32 -
4.10	SHRNUTÍ NUMERICKÝCH VÝPOČTŮ.....	- 35 -
4.11	POROVNÁNÍ V ČÍSLECH.....	- 36 -
5.	EKONOMICKÉ HLEDISKO	- 38 -
5.1	NÁKLADY NA SVAŘOVÁNÍ.....	- 38 -
5.1.1	<i>Rozměr plechu.....</i>	- 39 -
5.1.2	<i>Náklady na elektrody</i>	- 40 -
5.1.3	<i>Doba svařování.....</i>	- 40 -
5.1.4	<i>Mzda dělníků.....</i>	- 41 -
5.2	ORIGINÁLNÍ POTRUBÍ	- 42 -
5.3	VARIANTA 1	- 44 -
5.4	VARIANTA 2	- 46 -
5.5	GRAFICKÉ POROVNÁNÍ NÁKLADŮ	- 48 -
6.	ZÁVĚR	- 50 -
7.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	- 51 -
8.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	- 52 -
9.	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 54 -
10.	PŘÍLOHY	- 55 -

1. ÚVOD

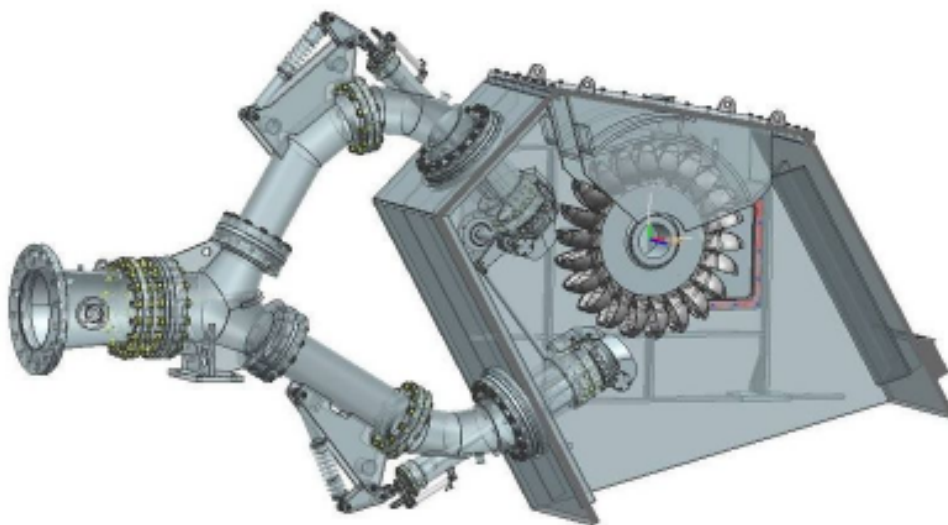
Peltonova turbína byla vynalezena Lestrem Allanem Peltonem, synem amerického farmáře z Ohia v roce 1880 (obr. 1). Jedná se o turbínu rovnotlakou s tangenciálním ostřikem lopatek oběžného kola. Používá se pro vysoké spády, a to až do 1800 m a relativně malé průtoky do $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



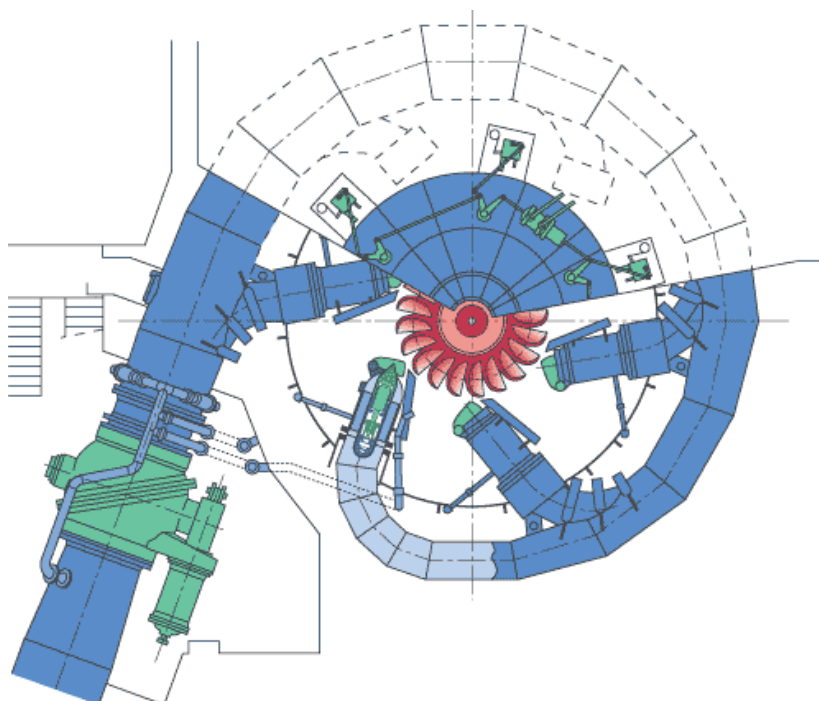
Obr. 1 – Původní patent Peltonova kola [8]

Oběžné kolo Peltonovy turbíny může být umístěno buď horizontálně nebo vertikálně. U horizontálního uložení jsou maximálně dvě dýzy (obr. 2), u vertikálního uložení je počet dýz čtyři až šest (obr. 3). V energetice se používá vertikálním uložení pro výkon až 400 MW. Účinnost u malých turbín je okolo 80 až 85%, u větších okolo 90 až 95%. [3, s.10]

Tématem této diplomové práce je modifikace stávajícího řešení okružního potrubí pro pětidýzovou Peltonovu turbínu s vertikálním uložení. Na obrázku 3 je zobrazena koncepce z hydraulického hlediska optimální, avšak technologicky a ekonomicky náročná. Potrubí se postupně zužuje tak, aby byl zachován rovnoměrný tlak v celém potrubí a také stejný průtok v každé dýze. Tato konstrukce, jak již bylo uvedeno, je velmi složitá na výrobu, proto je snahou hledat řešení, jak konstrukci zjednodušit při zachování optimálních hydraulických parametrů a nižších nákladech.



Obr. 2 – Dvoudýzová horizontální Peltonova turbína [9]



Obr. 3 – Pětidýzová vertikální Peltonova turbína [8]

2. CÍL

Tato diplomová práce navazuje na předchozí diplomovou práci, která se zabývala možnostmi, jak zjednodušit přívodní potrubí pro pětidýzovou Peltonovu turbínu. Bylo vytvořeno celkem 6 variant zjednodušeného potrubí (A až F). Rozbor výsledků přinesl poznatky, jakým směrem by se měl ubírat vývoj zjednodušeného okružního potrubí [2].

Hlavním úkolem bylo vytvořit nejméně dvě nové, zjednodušené geometrie přívodního potrubí pro pětidýzovou Peltonovu turbínu. V nových geometriích byly zachovány hlavní parametry potrubí z předchozí diplomové práce [2]. Zjednodušené potrubí bylo navrhováno s ohledem na optimální hydraulické parametry tj. stejný průtok v každé dýze a rovnoměrný tlak v okružním potrubí. Jedním s dílčích úkolů bylo porovnat jak nové geometrie potrubí s předchozími zjednodušenými geometriemi, tak i s originálním potrubím. Jednotlivé varianty byly posuzovány nejen z hydraulického hlediska, ale také byl učiněn zjednodušený ekonomický rozbor, tj. byl brán zřetel zejména na cenu spotřebovaných elektrod a čas nutný pro svařování.

3. ZÁKLADNÍ PARAMETRY

Základní parametry Peltonovy turbíny byly převzaty z předchozí diplomové práce.

Parametry [2, s.14]

Optimální jednotkové otáčky	n_{11opt}	41	min^{-1}
Optimální jednotkový průtok na 1 dýzu	Q_{11opt}	0,031	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Účinnost turbíny v optimu	η	90	%
Roztečný průměr oběžného kola	D	1	m
Průměr ústí dýzy	D_1	0,135	m
Vstupní průměr dýzy	D_{odb}	0,3706	m

Výpočet vstupní rychlosti [2, s.20]

Vstupní rychlost byla spočítána podle rovnice (3.1) a (3.2)

$$Q = Q_{11opt} \cdot n \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \quad (3.1)$$

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \quad (3.2)$$

- tyto rovnice byly odvozeny z rovnice pro výpočet jednotkového průtoku (3.3) a rovnice kontinuity (3.4)

$$Q_{11opt} = \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \quad (3.3)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad (3.4)$$

Dosazované hodnoty

Optimální jednotkový průtok na 1 dýzu	Q_{11opt}	0,031	$m^3 \cdot s^{-1}$
Průměr vstupního potrubí	D_0	0,825	m
Roztečný průměr oběžného kola	D	1	m
Počet dýz	n	5	1
Spád na turbínu	H	60	m

Výsledek rovnic 3.1 a 3.2

$$Q = 1,2 m^3 \cdot s^{-1}$$

$$v = 2,24 m \cdot s^{-1}$$

- vstupní rychlost do potrubí, při takto daných podmínkách

Hlavní rozměry [2, s.21]

V nových modelech byly zachovány všechny hlavní rozměry

Vstupní průměr	D_0	0,825	m	
Výstupní průměr dýzy	D_1	0,135	m	
Poloměr zakřivení prstence	R_{prst}	2,55	m	
Průměr odbočnic	D_{odb}	0,3076	m	
Umístění dýz	h	2	m	nad rovinou prstence
Umístění první odbočnice	ψ	21	°	od počátku zakřivení prstence

4. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ

K numerickému modelování proudění byl použit program ANSYS FLUENT 12.1. Jednotlivý postup práce je popsán v následujících kapitolách od tvorby modelu a výpočetní sítě až po vyhodnocení jednotlivých variant potrubí.

4.1 Modely okružního potrubí

Modely byly vytvořeny dle zadaných parametrů pomocí softwaru SOLIDWorks 2010 a následně importovány do programu pro tvorbu výpočetní sítě Gambit 2.4.6. Zde byla vytvořena výpočetní síť tak, aby vhodně a správně zachytila dané fyzikální jevy probíhající v okružním potrubí.

Tvorba výpočetní sítě pro všechny modely v programu Gambit 2.4.6 byla provedena vždy stejným systémem. Na stěnách byla vytvořena vhodná mezní vrstva a poté byl zbytek potrubí vysítován tak, aby velikost prvků v daném úseku potrubí byla dostatečně velká pro dosažení optimálních výsledků. Výpočetní síť byla tvořena čtyřstěnnými a šestistěnnými prvky. Počet prvků byl v průměru 3 000 000 v každém okružním potrubí.

Modely jsou bez regulačních mechanismů, což výrazně zjednodušilo tvorbu sítě. Regulační mechanismus nemá výrazný vliv na proudění v prstenci.

Počet prvků v jednotlivých modelech

Model	Počet prvků
Varianta 1	2 931 125
Varianta 1A	2 601 627
Varianta 1B	2 481 356
Varianta 2	3 377 297
Varianta 2A	3 451 850
Varianta 2B	3 209 190

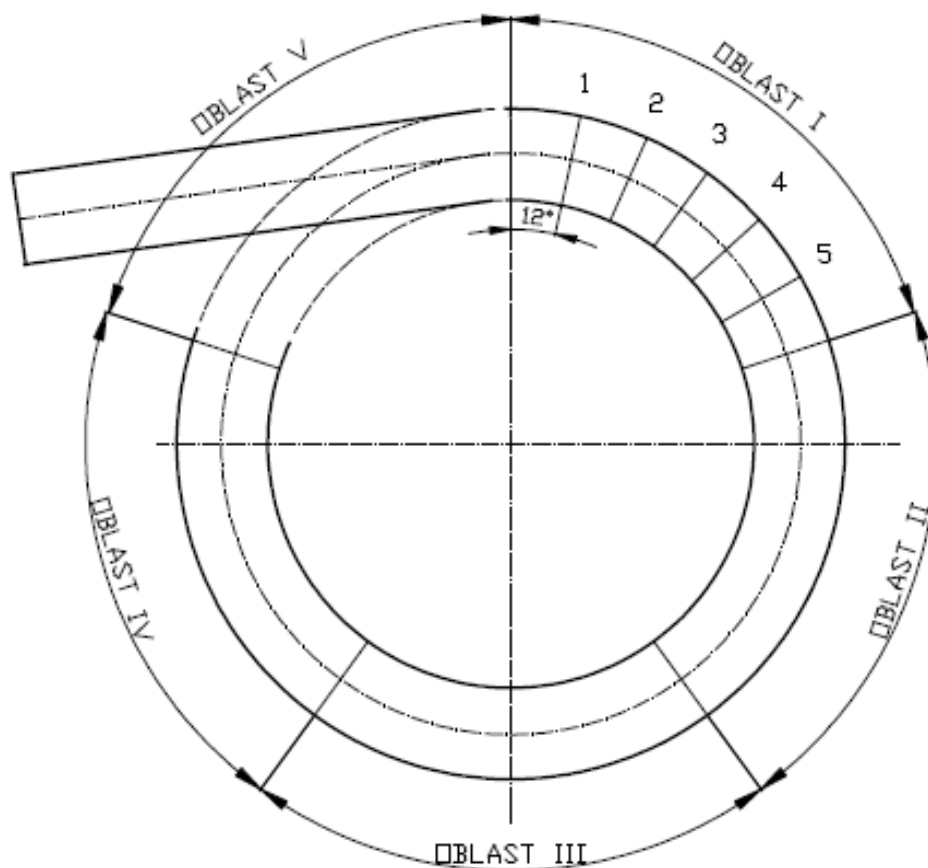
4.2 Nastavení výpočtů

Nastavení a hodnoty byly převzaty z předchozí diplomové práce [2]. Pro numerické řešení výpočtu byl zvolen turbulentní model $k - \varepsilon$ *realizable*, jehož vlastnosti vhodně popisují turbulenci, probíhající uvnitř systému. Na vstupu do potrubí byla dosazena rychlost, vyplývající z rovnice 3.2. Dále se přepokládá velká intenzita turbulence jak na vstupu, tak na výstupu z potrubí. Na výstupu je hodnota tlaku 0 Pa, která představuje hodnotu přetlaku na konci potrubí. Nastavený tlak na konci je hodnota atmosférického tlaku 101 325 Pa. Je nutno dodat, že vliv gravitace je zde zanedbán.

Řešič	Segregovaný			
	3D úloha			
	Stacionární proudění			
Turbulentní model	$k - \varepsilon$ Realizable			
	Standardní stěnová funkce			
	Modelové konstanty	C2 - ε	1,9	
		TKE Prandlovo číslo	1	
		TDR Prandlovo číslo	1,2	
Médium	Voda (water liquid)	Hustota	998,2	kg.m ⁻³
		Dynamická viskozita	0,001003	kg.m.s
Okrajové podmínky	Výstup z dýz	Přetlak	0	Pa
		Intenzita turbulence	10	%
		Hydraulický průměr	0,135	m
	Vstupní podmínka	Normálová rychlost	2,24	m.s ⁻¹
		Intenzita turbulence	10	%
		Hydraulický průměr	0,825	m
	Ostatní okrajová podmínka	Stěna (wall)		
Diskretizace	Tlak	Standart		
	Hybnost	Upwind 2.řádu		
	Turbulentní kin.energie	Upwind 2.řádu		
	Disipace	Upwind 2.řádu		
Podrelaxační koef.	Tlak	0,3		
	Hustota	1		
	Plošné síly	1		
	Hybnost	0,7		
	Turbulentní kin.energie	0,8		
	Disipace	0,8		
	Dynamická viskozita	1		

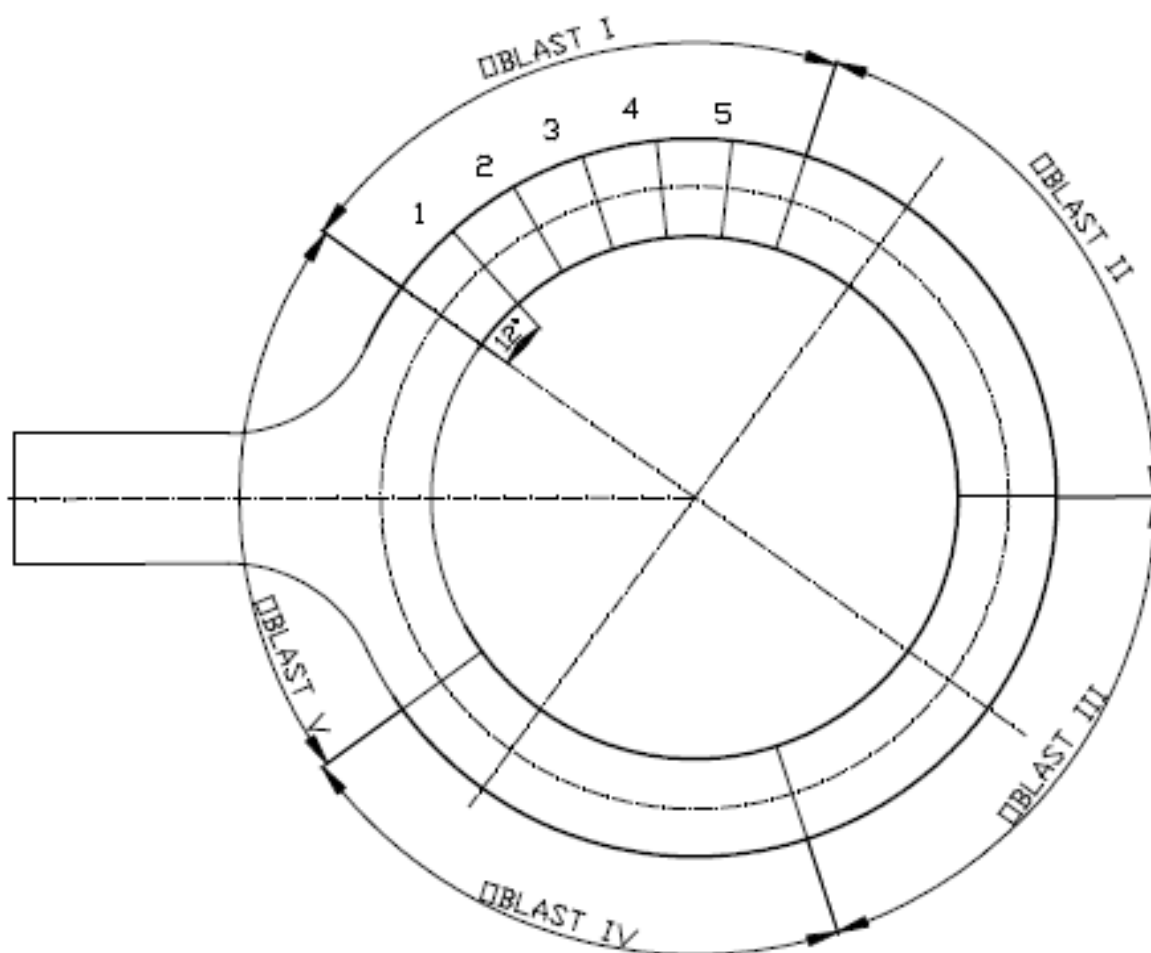
4.3 Vyhodnocení výpočtů

U každé varianty byl hodnocen průměrný statický tlak a Coriolisovo číslo v jednotlivých řezech prstence a průtok na koncích dýz. Jednotlivé řezy okružního potrubí byly rozděleny do pěti oblastí. Každá tato oblast je dále dělena na pět podoblastí, tj. řezů. Oblasti byly označeny římskými číslicemi I-V a řezy v jednotlivých oblastech jsou značeny arabskými číslicemi 1-5. Dýzy jsou také značeny arabskými číslicemi ve směru proudění, a to od 1 do 5.



Obr. 4 – Schéma vyhodnocení u varianty 2, 2A

U varianty 1, 1A a 1B jsou dýzy číslovány po směru hodinových ručiček od vstupu do okružního potrubí.



Obr. 5 – Schéma vyhodnocení u varianty 1, 1A, 1B

Statické tlaky

Statické tlaky byly počítány jako plošně vážené průměry a jsou zakresleny do grafů v daných řezech.

$$p_{stat} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4.3.1)$$

Průtoky

Průtoky byly počítány z hmotnostního toku danou plochou.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4.3.2)$$

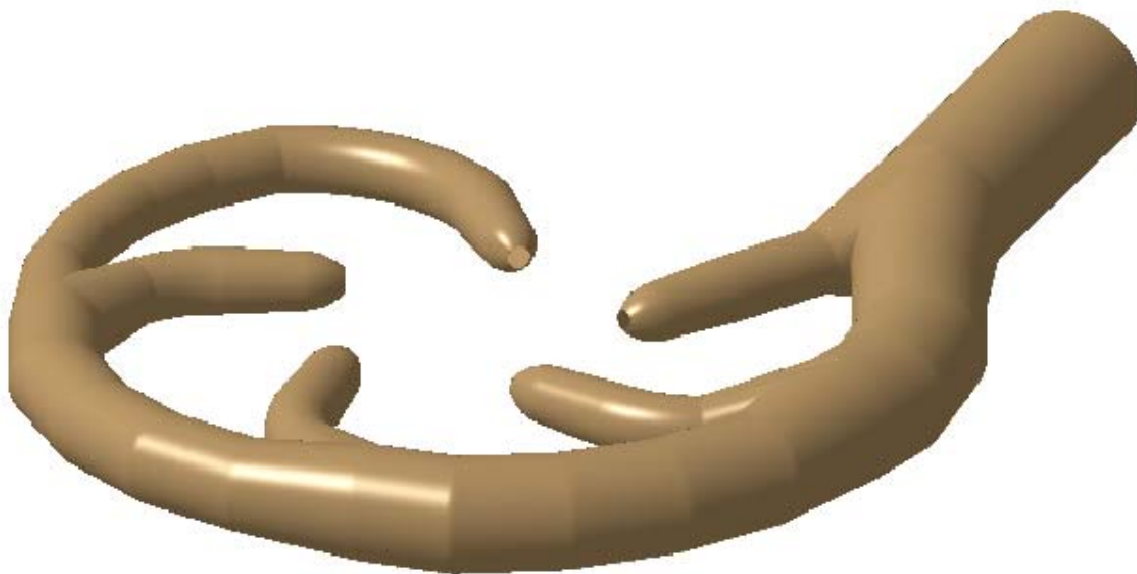
Coriolisovo číslo

Udává podíl skutečné kinetické energie v průřezu k průřezové kinetické energii, vyjádřené pomocí střední rychlosti na průřezu.

$$\alpha = \frac{\iint v^2 \cdot v_n dS}{v_s^3 \cdot S} \quad (4.3.3)$$

4.4 Originální potrubí

Originální potrubí bylo počítáno v předchozí diplomové práci [2]. V této diplomové práci zadávající firma poskytla detailní výkres optimálního okružního potrubí, na jehož základě byl vytvořen výpočetní model. Tento model byl následně spočítán a vyhodnocen. Hodnocení bylo zaměřeno na průtoky v jednotlivých dýzách, statické tlaky a Coriolisovo číslo v jednotlivých řezech.

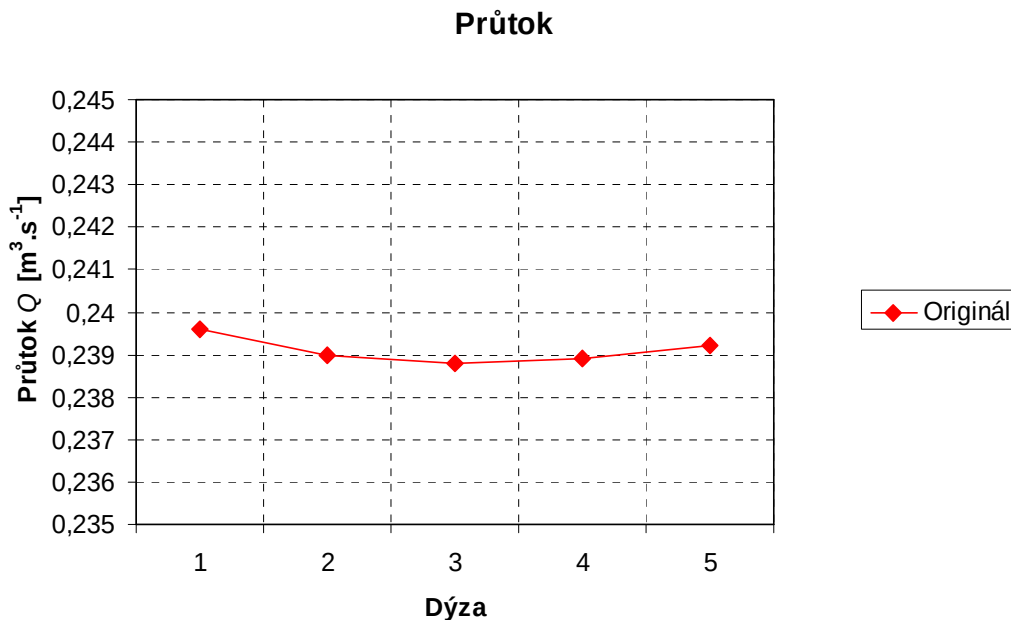


Obr. 6 – Model originálního potrubí

Vyhodnocení

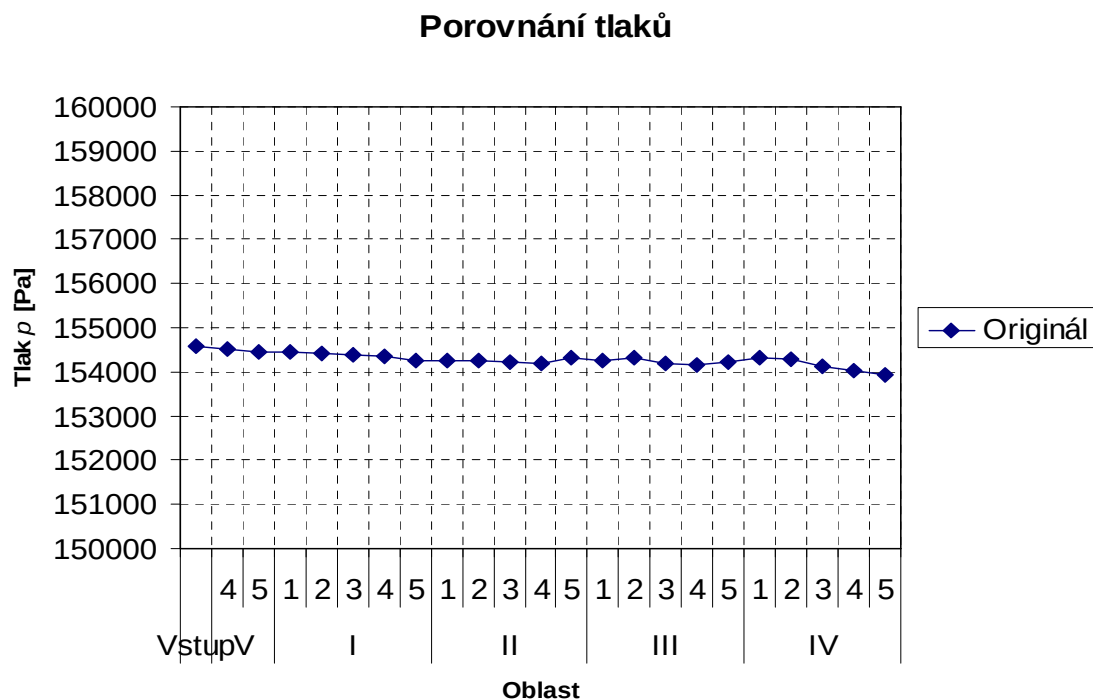
A) Průtok

Průtok jednotlivými dýzami je téměř konstantní, až na pokles průtok u třetí dýzy, což je způsobeno zakřivením potrubí.



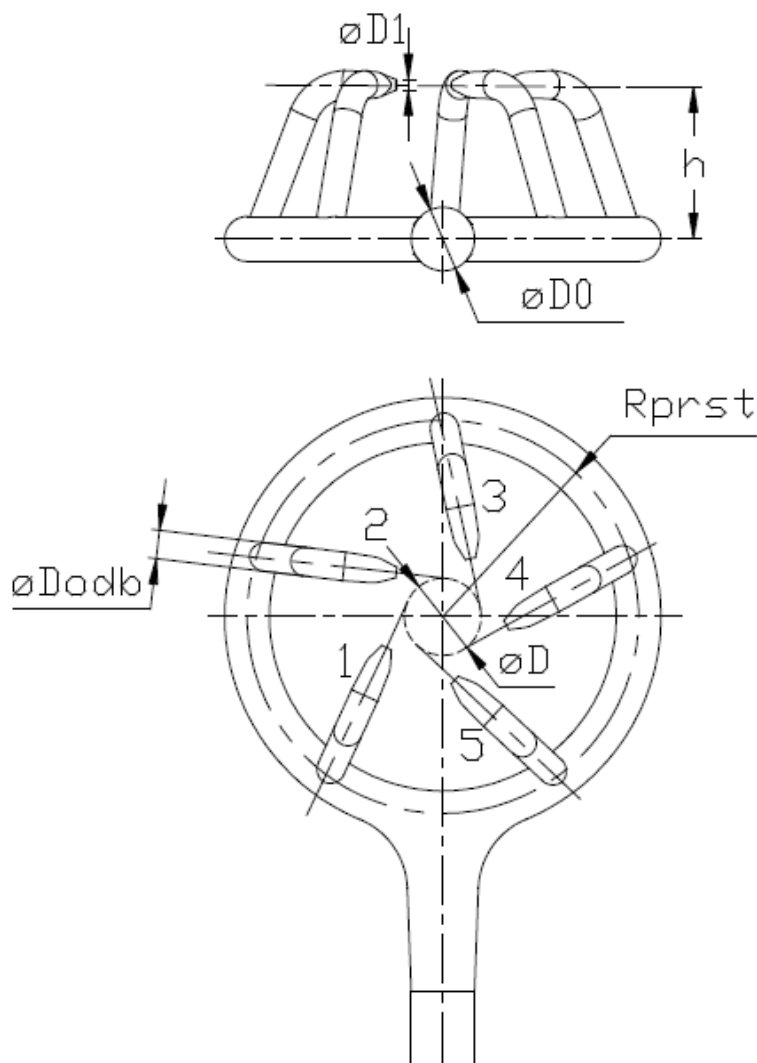
B) Tlaky

Z grafu je patrné, že tlak v celém potrubí je téměř rovnoměrný, což potvrzuje, že je navrženo optimálně.



4.5 Varianta 1

První varianta vychází z rozboru, který byl učiněn v předchozí diplomové práci [2, s.13, 14]. Tato varianta nebyla řešena na základě požadavku zadávající firmy. Z tohoto důvodu se autor zabýval touto možností zjednodušení, protože skýtala slibnou možnost ekonomických výhod.

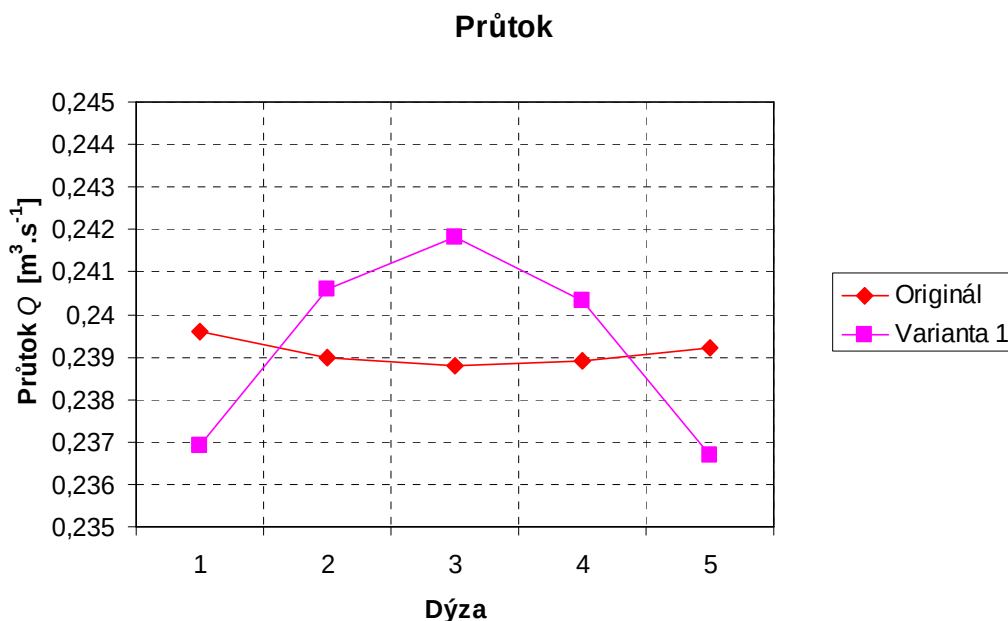


Obr. 7 – Schéma varianty 1

Vyhodnocení

A) Průtok

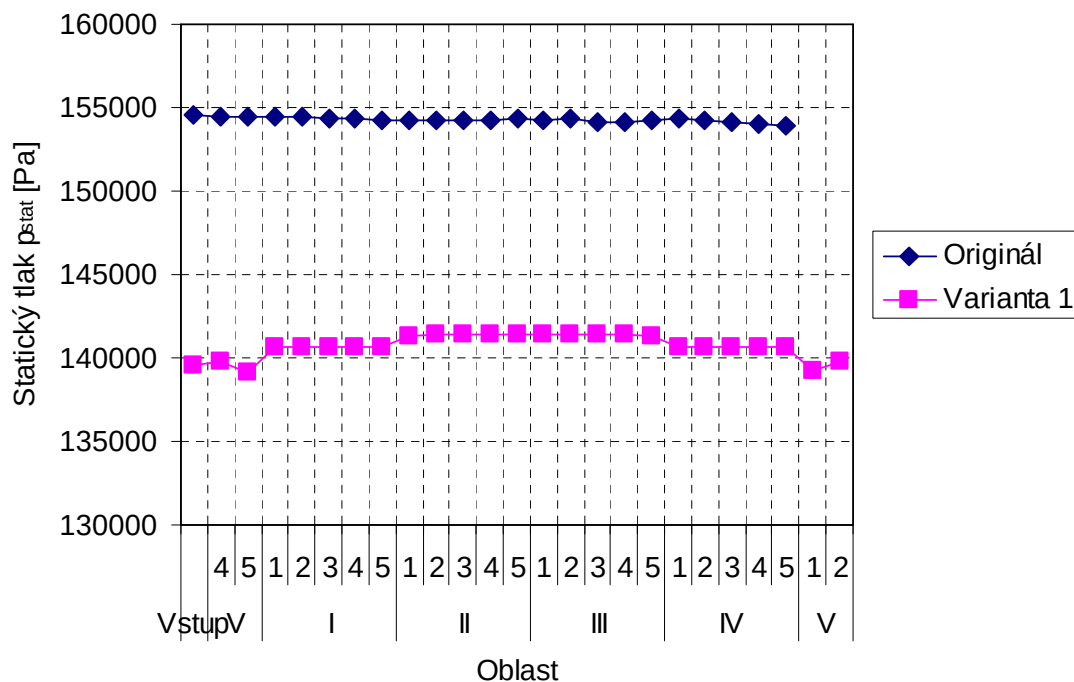
Výsledný vypočítaný průtok jednotlivými dýzami u této varianty je symetrický podle dýzy 3. Nejmenší průtok byl na dýzách 1 a 5 a největší na dýze 3. Toto je důsledek rozdělení proudu vody na vstupu do okružního potrubí. Průtok se rovnoměrně dělí na vstupu do zakřiveného prstence a přitom si zachovává stejnou rychlost v obou větvích jako na vstupu do okružního potrubí. V porovnání s originálním potrubím, které bylo ideálně navrženo z hydraulického hlediska, byl průtok jednotlivými dýzami rovnoměrný a rozdíl mezi maximálním a minimálním průtokem byl malý.



B) Statické tlaky

Výsledné statické tlaky jsou výrazně nižší oproti originálnímu potrubí, z čehož vyplývají nižší ztráty v potrubí. Také je patrný mírný nárůst statických tlaků za jednotlivými dýzami, neboť rychlost v tomto prostoru klesá. V oblastech II a III jsou statické tlaky konstantní. Z následujícího grafu je zřejmá symetrie statických tlaků, jejíž osa se nachází na hranici oblastí II a III.

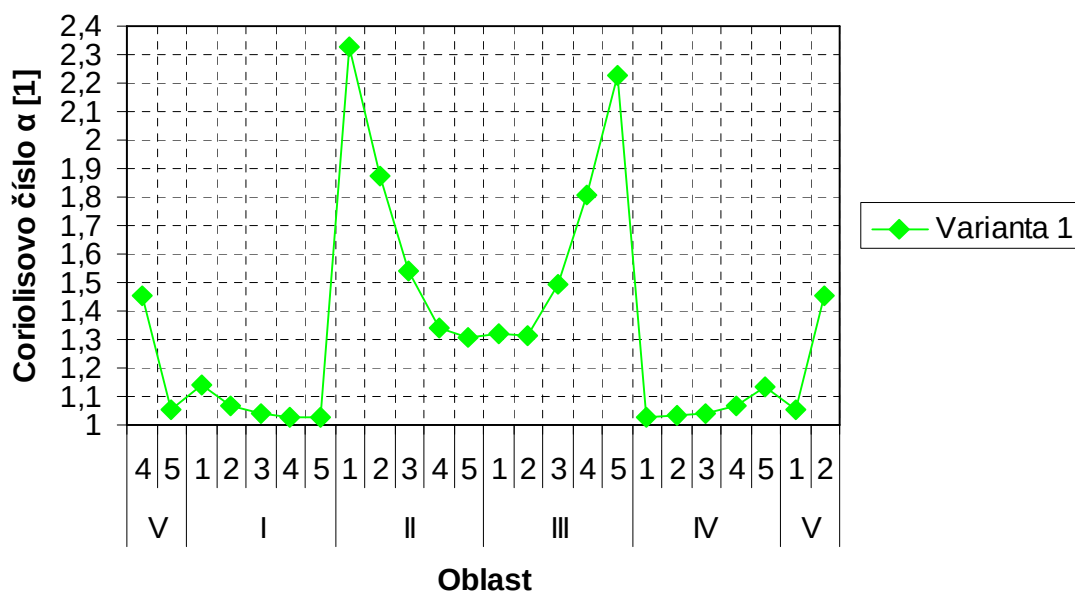
Porovnání tlaků



C) Coriolisovo číslo

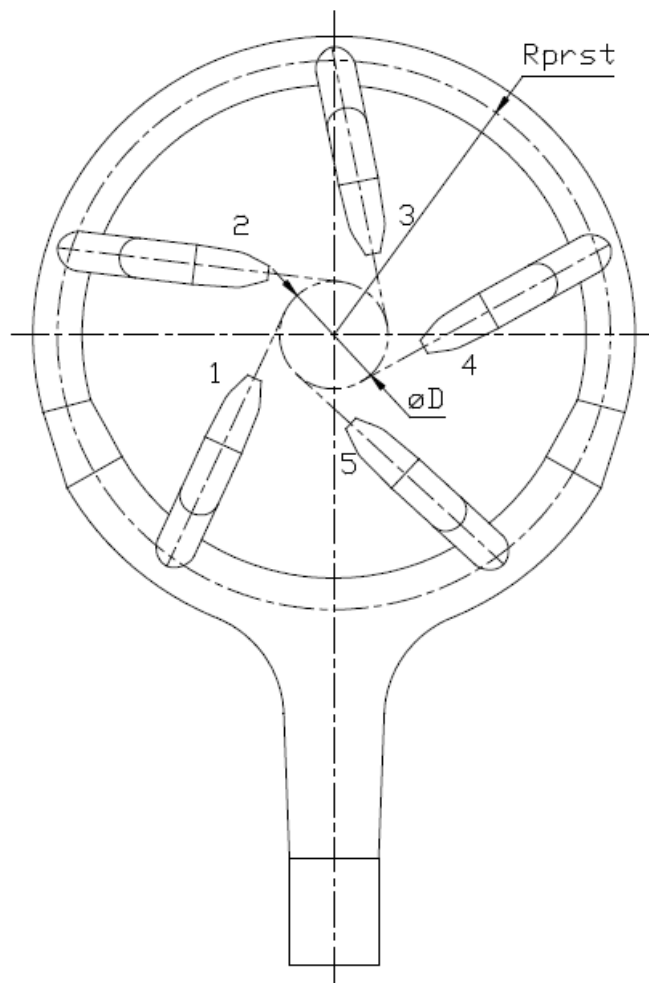
Jednou z možností, jak posoudit charakter proudění uvnitř potrubí, je Coriolisovo číslo. K nárůstu Coriolisova čísla na hodnotu téměř 2,4 dochází za druhou resp. čtvrtou dýzou, kde nastalo výrazné zpomalení proudu vody. Jak u průtoku a statických tlaků, tak i zde má Coriolisovo číslo symetrický průběh.

Coriolisovo číslo



4.6 Varianta 1A

Na základě výsledků byla varianta 1 upravena tak, že za první a pátou dýzou (tedy trysky nejbliže vstupu) byl průměr potrubí zúžen pro dosažení vyšší rychlosti a tím došlo k redukci statických tlaků za první a pátou dýzou. Z ekonomického hlediska by tato úprava neměla znamenat výrazné navýšení nákladů na výrobu.

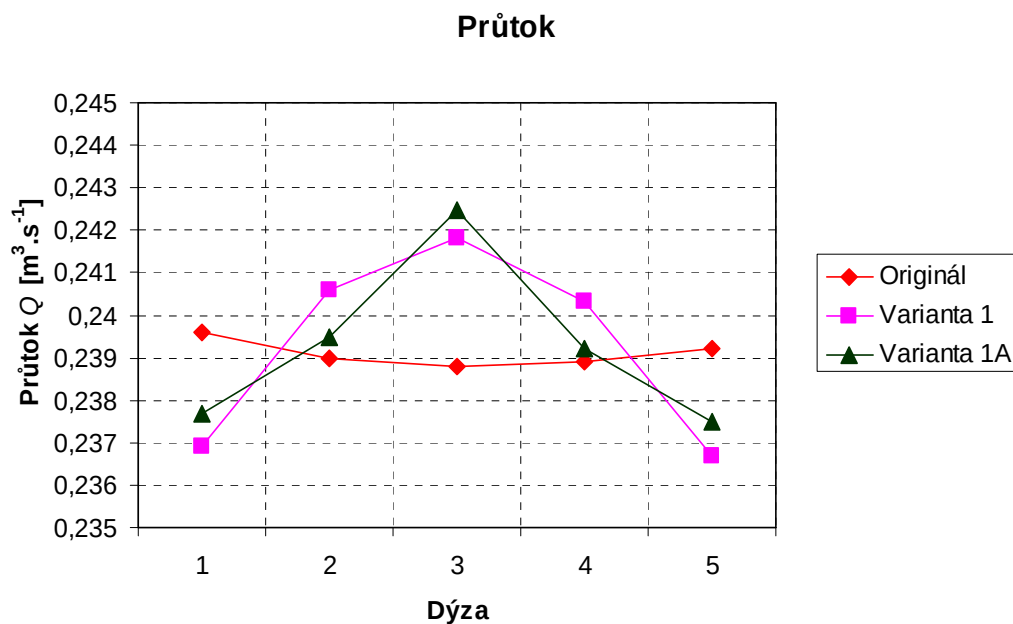


Obr. 8 – Schéma varianty 1A

Vyhodnocení

A) Průtok

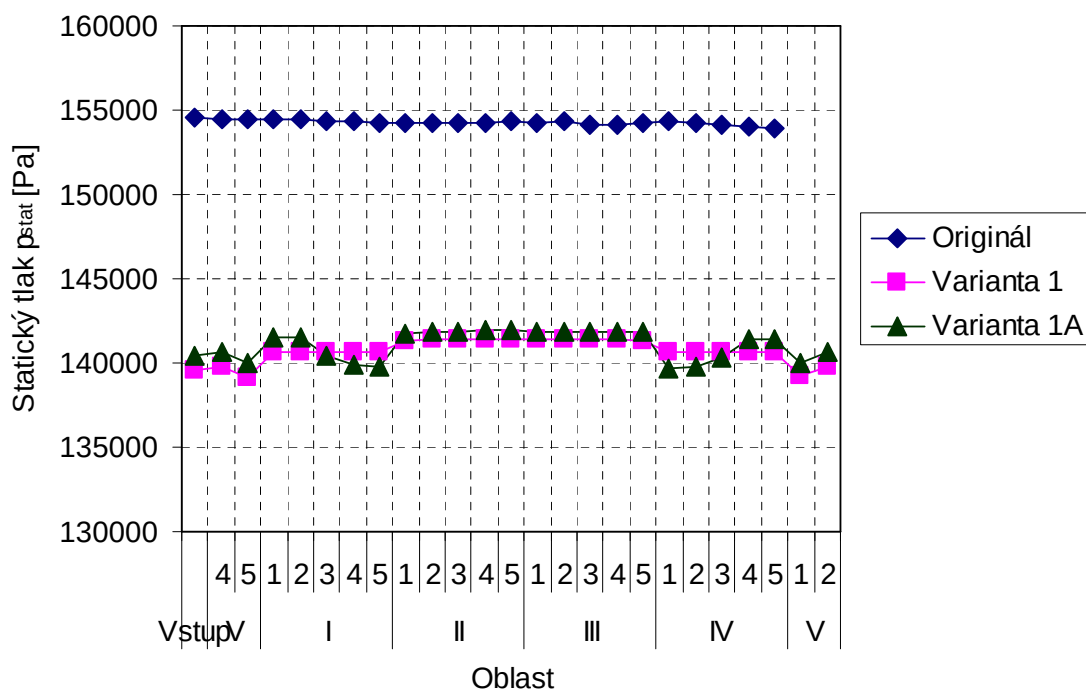
Po provedených změnách na okružním potrubí se průtok na první a páté dýze změnil, a to tím způsobem, že se mírně zvýšil. Naproti tomu na druhé a čtvrté dýze průtok výrazněji klesl, čímž se rozdíl průtoků mezi první (resp. pátou) a druhou (resp. čtvrtou) dýzou zmenšil. Negativně se tato úprava projevila na třetí dýze, kde došlo ke zvýšení průtoku oproti variantě 1.



B) Statický tlak

Statický tlak na vstupu, tak i v oblasti V a na počátku oblasti I (resp. na konci oblasti IV) mírně vzrostl oproti variantě 1. Poté lze sledovat pokles statického tlaku, a to díky zmenšení průměru potrubí. Následně se tlak opět dostal na konstantní úroveň jako u varianty 1.

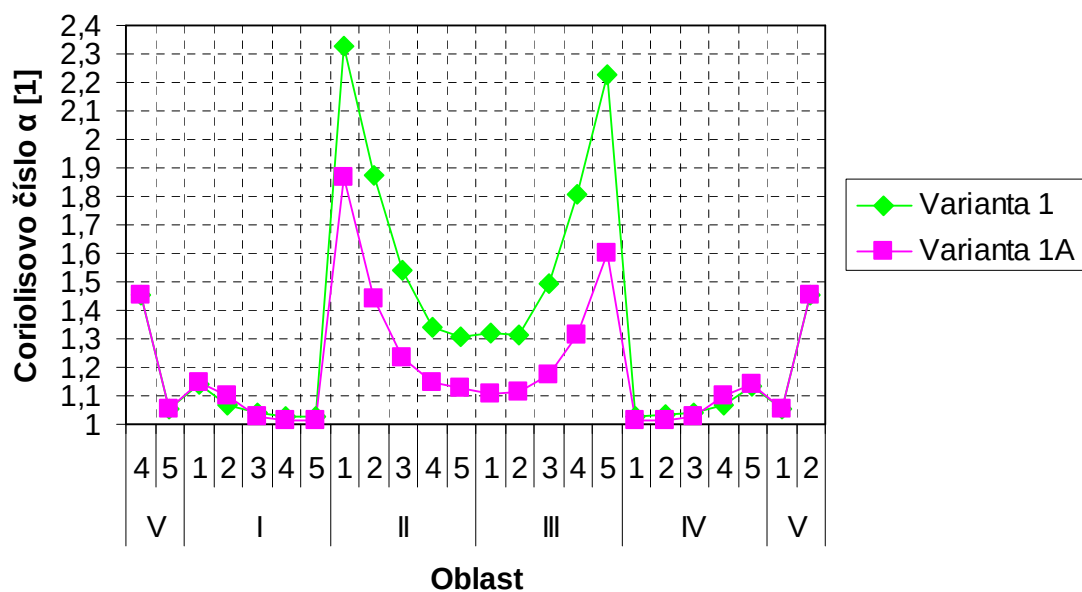
Porovnání tlaků



C) Coriolisovo číslo

Vývoj Coriolisova čísla v oblastech I, IV a V téměř kopíruje původní Variantu 1, ale v oblastech II a III dochází k výraznému poklesu Coriolisova čísla, a to pod hranici 1,9.

Coriolisovo číslo



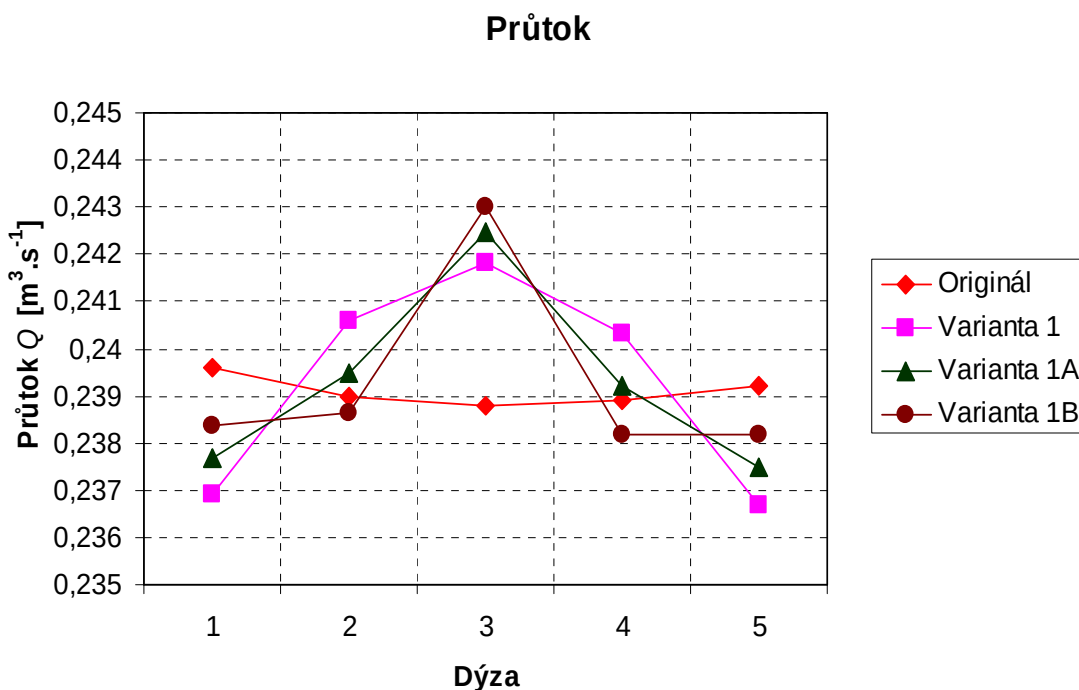
4.7 Varianta 1B

Po zhodnocení byla varianta 1A ještě dále upravena tak, že vše bylo zachováno jak u varianty 1A, ale průměr potrubí byl zmenšen, aby proud vody za dýzami 1 a 5 byl ještě více urychlen.

Vyhodnocení

A) Průtok

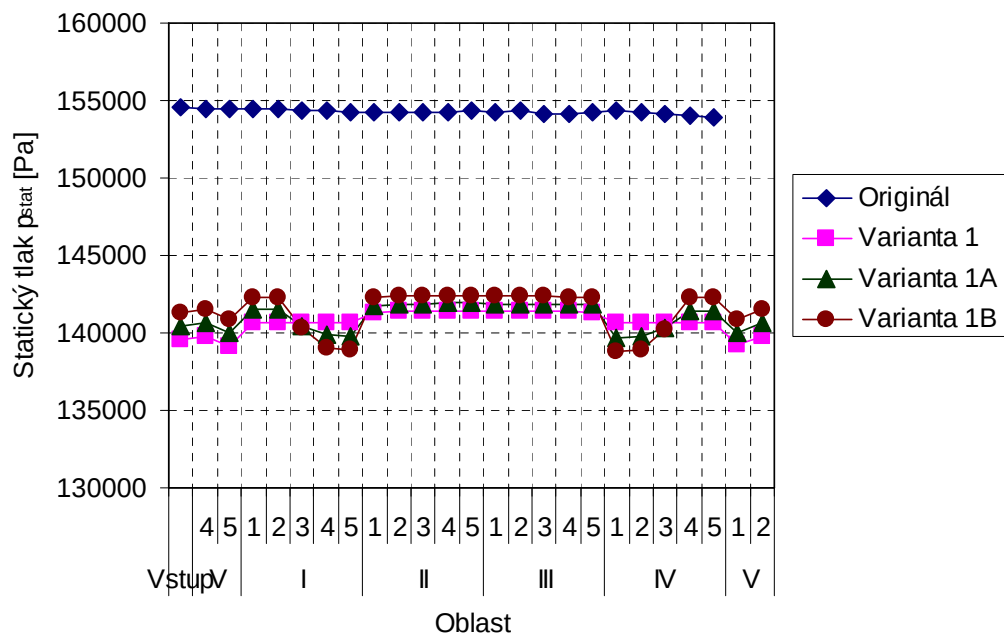
Průtok na první dýze se zvýšil a zároveň se na druhé dýze snížil, tedy došlo k snížení rozdílu průtoků mezi první a druhou dýzou. Dle symetrického rozdělení průtoků se tentýž jev objevil i na čtvrté a páté dýze, kde průtoky zůstaly stejné. Naopak nepříznivě tato změna ovlivnila průtok na třetí dýze, který vzrostl.



B) Statické tlaky

Průběh tlaků má stejný charakter jako u varianty 1A, ale s tím rozdílem, že statické tlaky jak na vstupu, tak v oblasti II a III jsou o něco vyšší. Také je nutno zmínit, že v přechodu z většího průměru na menší průměr potrubí naopak došlo ke snížení statického tlaku.

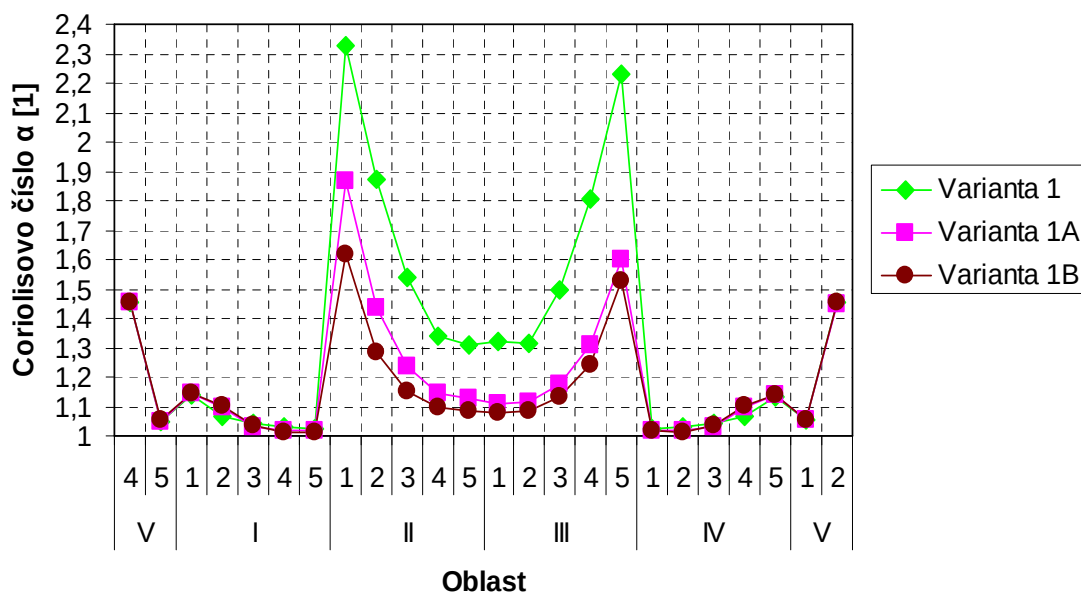
Porovnání tlaků



C) Coriolisovo číslo

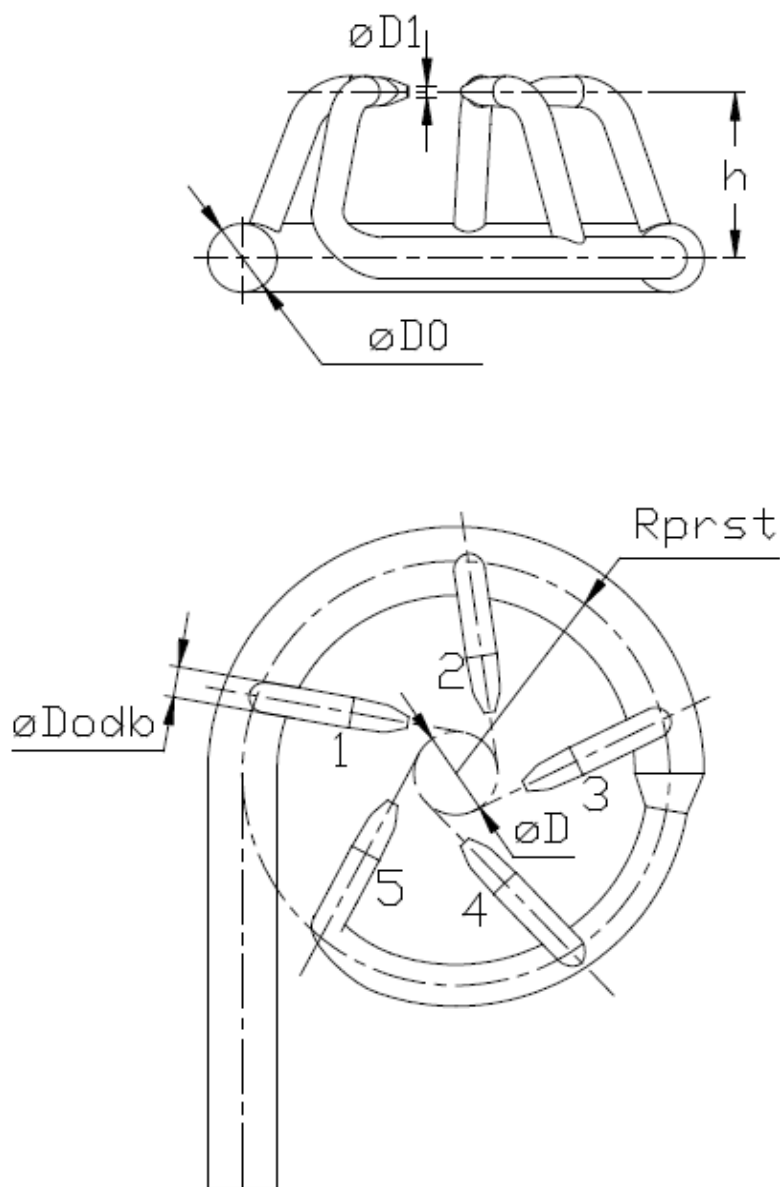
Hodnoty Coriolisova čísla jsou v jednotlivých řezech téměř stejné, výjimaje oblasti II a III. Za druhou dýzou (řez 1 v oblasti II) bylo dosaženo snížení původní hodnoty Coriolisova čísla 2,32 u varianty 1 až na hodnotu 1,62. Postupně dochází k rovnoměrnějšímu rozložení Coriolisova čísla v jednotlivých řezech.

Coriolisovo číslo



4.8 Varianta 2

Druhá varianta byla modifikací varianty A [2, s.24, 25]. Z výpočtů tohoto typu okružního potrubí byl zřejmý značný rozdíl průtoků mezi první a pátou dýzou, a s tím související skokový nárůst tlaků za každou dýzou. Byla provedena menší úprava konstrukce tím, že se zmenšil průměr potrubí za třetí dýzou, čímž mělo dojít ke snížení rozdílu průtoků v jednotlivých dýzách.

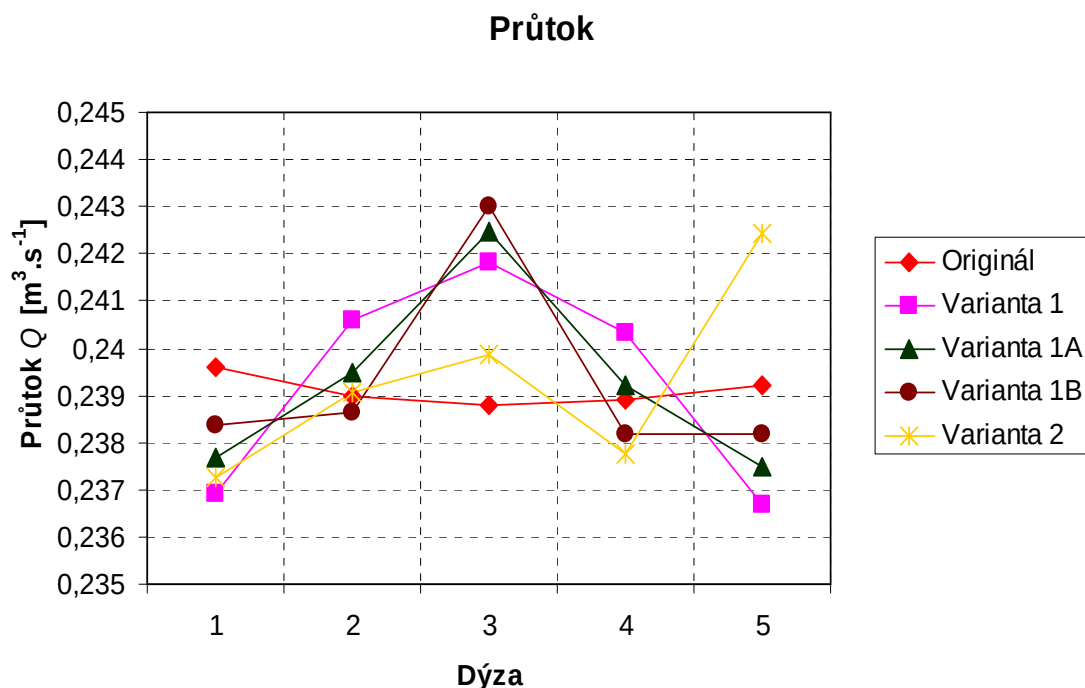


Obr. 9 – Schéma varianty 2

Vyhodnocení

A) Průtok

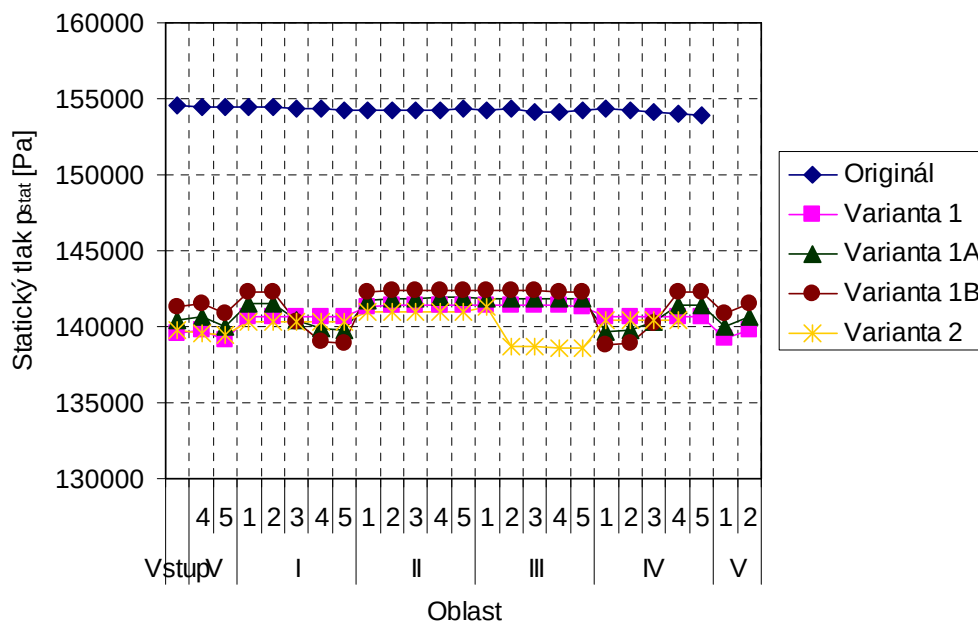
Na grafu je patrný rostoucí charakter průtoku na jednotlivých dýzách, ke kterému docházelo i u předchozích variant A až F, které byly počítány v předešlé diplomové práci. V našem případě je však zřejmý vliv zúžení za třetí dýzou, kde došlo ke snížení průtoku. V případě, kdy je průměr okružního potrubí konstantní, lze vidět nárůst průtoku na jednotlivých dýzách. Vlivem snížení průměru potrubí za třetí dýzou sice došlo k prudkému poklesu průtoku, ale naopak průtok na páté dýze strmě narostl. V konečném důsledku navržená úprava potrubí výrazněji ovlivnila pouze průtok na čtvrté dýze.



B) Statické tlaky

Jak průtok, tak statické tlaky jsou ve vzájemné relaci. Na počátku je vidět nárůst statického tlaku, jak tomu bylo i v předchozích vypočtených variantách. V přechodu z oblasti II do oblasti III dochází k výraznému poklesu tlaků pod hodnotu $140\,000\text{ Pa}$ a poté k jeho následnému nárůstu na hodnotu kolem $140\,000\text{ Pa}$.

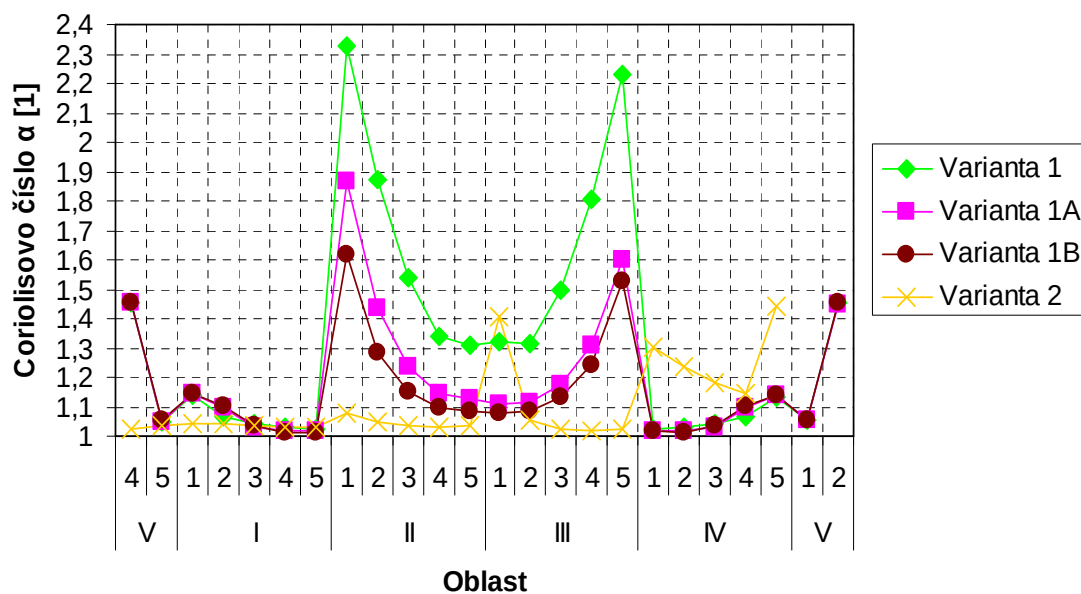
Porovnání tlaků

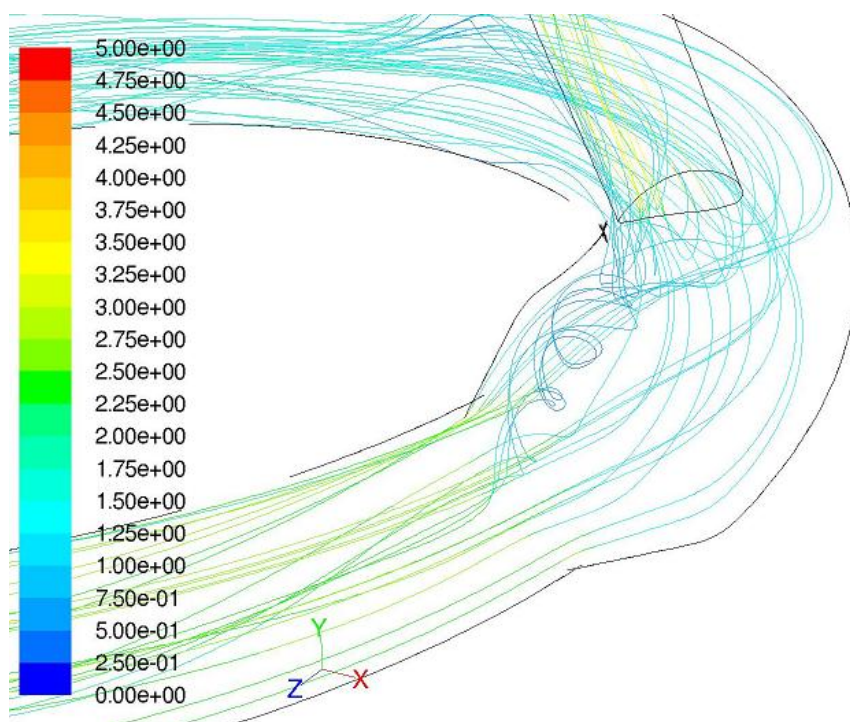


C) Coriolisovo číslo

V tomto případě je Coriolisovo číslo mnohem rovnoměrnější než u předchozích variant. K náhlému nárůstu došlo v prvním řezu v oblasti III, kde nastalo zavíření proudu vody, způsobené odběrem třetí dýzy, z čehož vyplynulo snížení rychlosti v tomto průřezu. V následujících řezech se proudění pomalu stabilizovalo, neboť zde se již uplatňuje zúžení potrubí, tedy v oblasti III, než narazí na čtvrtou dýzu. V oblasti IV se proudění vody opět zpomalí.

Coriolisovo číslo

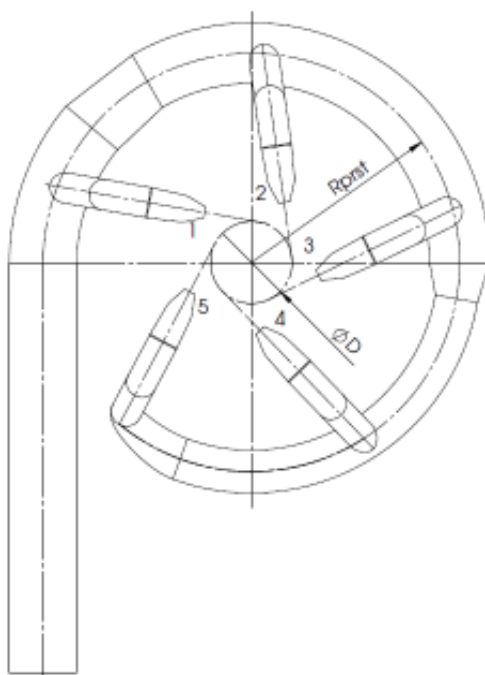




Obr. 10 – Detail zavíření za třetí dýzou

4.9 Varianta 2A

U této modifikace byl zúžen průměr okružního potrubí navíc ještě za první dýzou pro snížení průtoku jak na druhé, tak na třetí dýze.

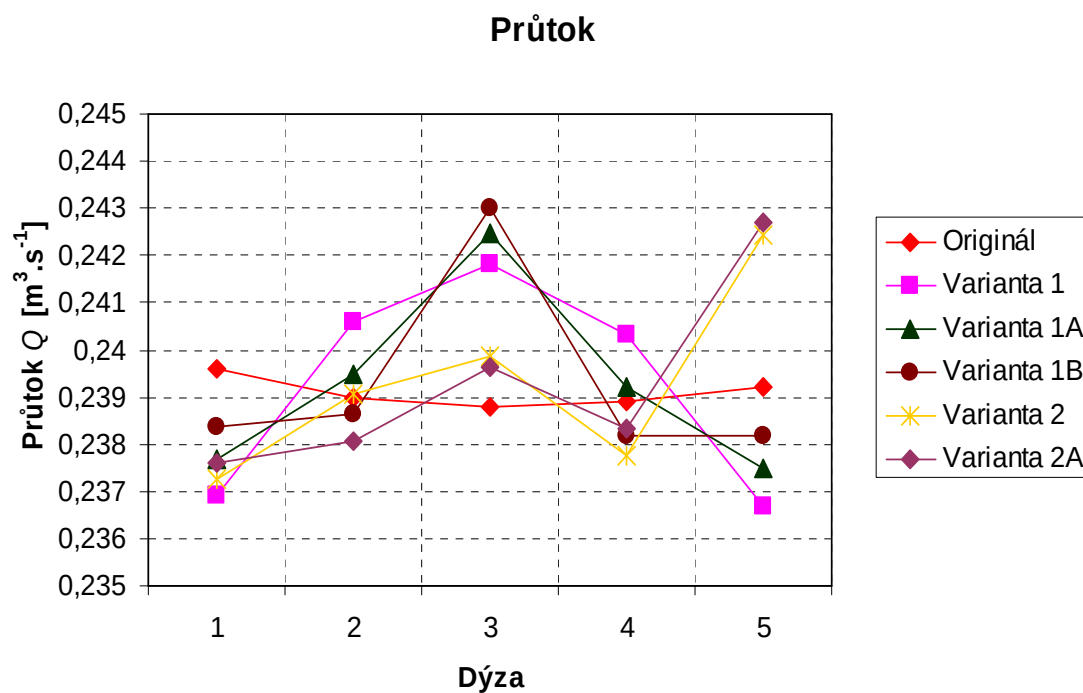


Obr. 11 – Schéma varianty 2A

Vyhodnocení

A) Průtok

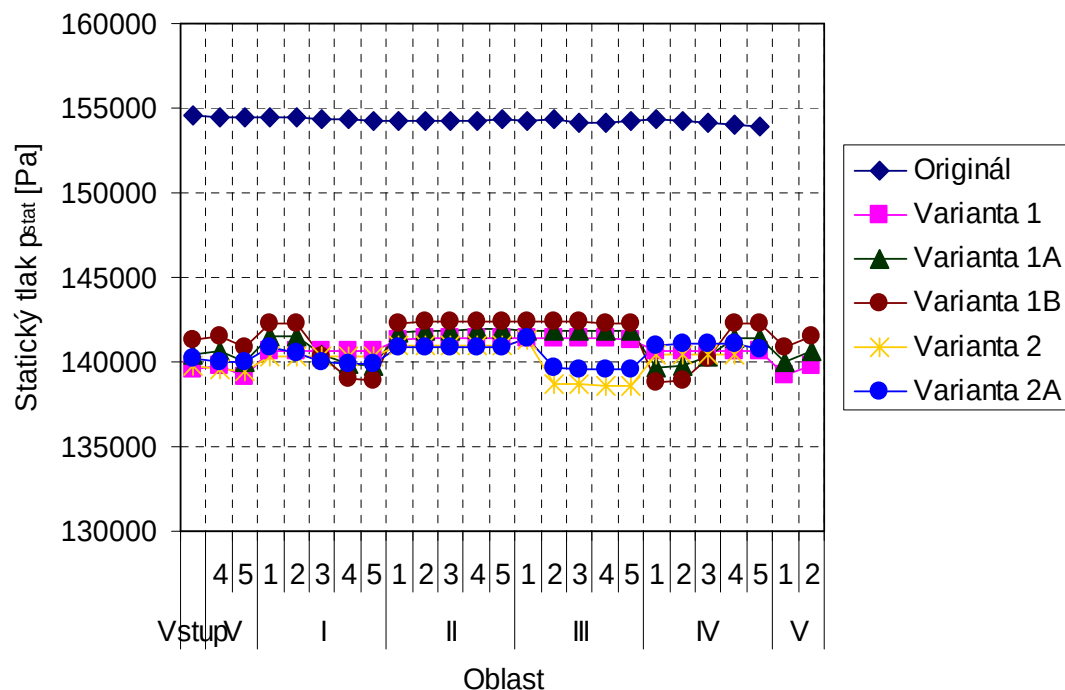
Vlivem snížení průměru potrubí nastal pokles průtoku na druhé dýze, ale na třetí dýze se průtok dostal na téměř stejnou hodnotu jako u varianty 2. Na čtvrté a páté dýze naopak průtok narostl.



B) Statické tlaky

Rozložení statických tlaku je identické s výjimkou v oblasti III, kde nastává výrazný pokles. Lze dále pozorovat malý pokles statických tlaků za první dýzou, tedy zúžení mělo pouze malý vliv.

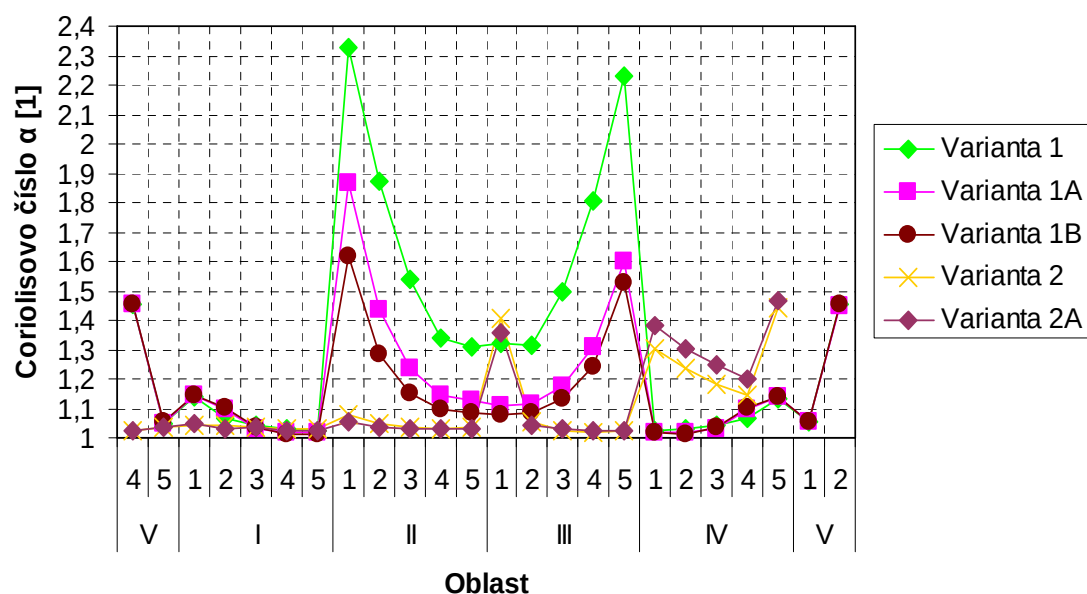
Porovnání tlaků



C) Coriolisovo číslo

V tomto případě má Coriolisovo číslo téměř identický průběh jako u varianty 2. Jediný rozdíl se projevil na konci, tedy za čtvrtou dýzou, kde nastalo větší zpomalení proudu vody.

Coriolisovo číslo



4.10 Shrnutí numerických výpočtů

Jednotlivé varianty byly počítány po dobu, kdy bylo dosaženo konvergence residuí, přičemž tato residua by měla klesnout pod 10^{-3} . V našem případě residua klesla až pod hodnoty 10^{-6} po 8 000 až 10 000 iterací.

Statický tlak všech variant, kromě originálního potrubí, se pohyboval v rozmezí 135 až 145 kPa. Originální potrubí, jehož výsledky byly převzaty [2], se výrazně liší. U této varianty se statické tlaky pohybovaly kolem 155 kPa. Tato skutečnost mohla být způsobena rozdílným počtem prvků, neboť bylo počítáno až s trojnásobkem prvků (originální potrubí mělo kolem 1 000 000 prvků, varianty 1 až 2A měly v průměru 3 000 000 prvků).

4.11 Porovnání v číslech

Statický tlak p_{stat} [Pa]							
Oblast	Řez	Originál	Varianta 1	Varianta 1A	Varianta 1B	Varianta 2	Varianta 2A
Vstup		154583,9	139601,61	140441,33	141276,52	139749,39	140216,42
V	4	154506,29	139824,63	140685,66	141510,23	139518,42	139986,64
	5	154457,41	139176,61	140050,48	140867,52	139488,84	139956,23
I	1	154439,79	140620,17	141481,05	142307,47	140366,67	140832,31
	2	154405,4	140638,67	141492,64	142318,64	140354,98	140543,81
	3	154390,93	140634,63	140392,95	140284,69	140341,88	139979,47
	4	154351,01	140622,3	139850,22	138981,89	140328,09	139868,53
	5	154243,7	140608,91	139803,64	138895,34	140311,48	139840,17
II	1	154253,02	141343,53	141790,91	142241,67	140971,45	140870,34
	2	154242,64	141372,69	141868,64	142343,39	140981,59	140874,12
	3	154222,67	141394,44	141900,31	142373,23	140976,62	140861,67
	4	154189,66	141406	141909,83	142377,45	140969,16	140847
	5	154318,55	141405,5	141906,34	142369,41	140957,67	140829,39
III	1	154267,9	141409,41	141889,98	142350,19	141356,55	141454,3
	2	154312,3	141412,31	141895,73	142359,67	138727,2	139648,42
	3	154177,66	141402,34	141890,39	142358	138683,02	139594,98
	4	154148,35	141382,91	141869,55	142334,53	138635,02	139555,81
	5	154232,08	141356,06	141814,05	142245,33	138583,38	139511,14
IV	1	154309,11	140613,91	139714,39	138836,48	140416,3	141014,61
	2	154291,05	140627,31	139762,52	138924,39	140443,02	141040,86
	3	154138,07	140639,75	140322,11	140242,63	140457,44	141056,61
	4	154027,56	140644,3	141460,27	142306,52	140466,17	141067,95
	5	153929,74	140627,33	141450,73	142297,91	140137,69	140773,55
V	1		139188,64	139998,84	140848,2		
	2		139835,53	140651,7	141496,72		

Tabulka 1 – Statický tlak v jednotlivých řezech

Průtok Q [m ³ .s ⁻¹]							
Dýza		Originál	Varianta 1	Varianta 1A	Varianta 1B	Varianta 2	Varianta 2A
1	Q_1 [m ³ .s ⁻¹]	0,2396	0,2369	0,2377	0,2384	0,2373	0,2376
2	Q_2 [m ³ .s ⁻¹]	0,239	0,2406	0,2395	0,2386	0,2391	0,2381
3	Q_3 [m ³ .s ⁻¹]	0,2388	0,2418	0,2425	0,2430	0,2398	0,2397
4	Q_4 [m ³ .s ⁻¹]	0,2389	0,2403	0,2392	0,2382	0,2378	0,2383
5	Q_5 [m ³ .s ⁻¹]	0,2392	0,2367	0,2375	0,2382	0,2424	0,2427
	$Q_{max} - Q_{min}$	0,0008	0,0051	0,0050	0,0049	0,0052	0,0051
Vstup	Q_V [m ³ .s ⁻¹]	1,1955	1,1964	1,1964	1,1964	1,1964	1,1964

Tabulka 2 – Porovnání průtoků

Rozdělní průtok							
Dýza		Originál	Varianta 1	Varianta 1A	Varianta 1B	Varianta 2	Varianta 2A
1	Q_1 [%]	20,04	19,80	19,87	19,92	19,83	19,86
2	Q_2 [%]	19,99	20,11	20,02	19,95	19,98	19,90
3	Q_3 [%]	19,97	20,21	20,27	20,31	20,05	20,03
4	Q_4 [%]	19,98	20,09	19,99	19,91	19,87	19,92
5	Q_5 [%]	20,01	19,78	19,85	19,91	20,26	20,29

Tabulka 3 – Rozdělení průtoků v procentech

Coriolisovo číslo α [1]						
Oblast	Řez	Varianta 1	Varianta 1A	Varianta 1B	Varianta 2	Varianta 2A
V	4	1,4536	1,4554	1,4563	1,0225	1,0222
	5	1,0509	1,0504	1,0515	1,0358	1,0357
I	1	1,1382	1,1436	1,1445	1,0443	1,0505
	2	1,0696	1,0981	1,1042	1,0395	1,0303
	3	1,0412	1,0296	1,0338	1,0354	1,0336
	4	1,0298	1,0164	1,0142	1,0317	1,0249
	5	1,0246	1,0160	1,0149	1,0309	1,0243
II	1	2,3262	1,8646	1,6204	1,0796	1,0561
	2	1,8755	1,4373	1,2827	1,0474	1,0362
	3	1,5402	1,2334	1,1492	1,0374	1,0305
	4	1,3404	1,1451	1,0965	1,0318	1,0273
	5	1,3092	1,1275	1,0834	1,0335	1,0277
III	1	1,3191	1,1077	1,0789	1,4063	1,3587
	2	1,3157	1,1136	1,0879	1,0527	1,0438
	3	1,4965	1,1736	1,1310	1,0231	1,0276
	4	1,8084	1,3120	1,2410	1,0205	1,0241
	5	2,2295	1,5984	1,5257	1,0224	1,0266
IV	1	1,0254	1,0163	1,0152	1,3004	1,3836
	2	1,0303	1,0166	1,0142	1,2342	1,3051
	3	1,0414	1,0297	1,0337	1,1848	1,2457
	4	1,0691	1,0969	1,1023	1,1477	1,1981
	5	1,1355	1,1373	1,1388	1,4401	1,4671
V	1	1,0531	1,0518	1,0524		
	2	1,4556	1,4512	1,4524		

Tabulka 4 – Coriolisovo číslo v jednotlivých řezech

5. EKONOMICKÉ HLEDISKO

V této kapitole bylo provedeno posouzení ekonomických kritérií, kterými byly náklady na spotřebované elektrody, doba svařování a mzda dělníků. Tato kritéria byla vybrána proto, aby ukázala výhody zjednodušení vybraných variant. Byly porovnány náklady na výrobu originálního potrubí s variantami 1 a 2. Analýza nezahrnuje náklady na výrobu ústí dýzy.

Základní parametry potrubí

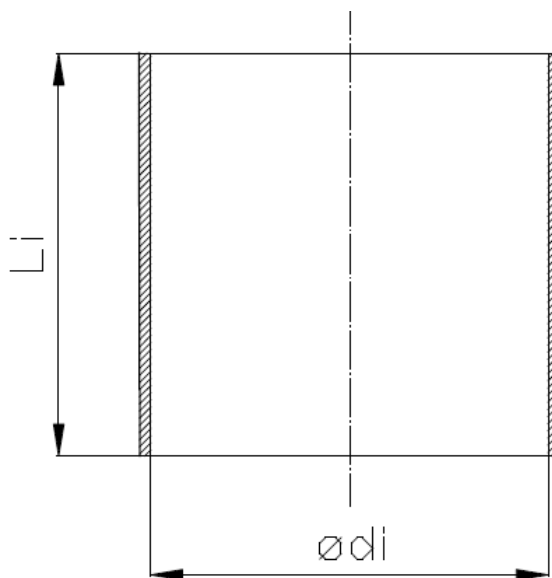
Vstupní průměr	D_0	0,825	m
Výstupní průměr	D_1	0,135	m
Poloměr zakřivení prstence	R_{prst}	2,55	m
Jmenovitý průměr odbočnic	D_{odb}	0,37	m
Umístění první odbočnice	ψ	21	°

5.1 Náklady na svařování

Originální potrubí bylo rozděleno na jednotlivé segmenty, které byly tvořeny ze skružených plechů. Takto upravené plechy byly svařeny jak podélně, tak i po obvodu. Naproti tomu byla varianta 1 a 2 tvořena s bezešvých trubek, kdy jednotlivé trubky a trouby byly svařeny pouze po obvodu.

5.1.1 Rozměr plechu

U jednotlivých variant okružního potrubí byla uvažována jak střední hodnota průměru, tak i délky každého segmentu. Jednotlivé segmenty resp. části potrubí byly značeny indexem i . Potom rozměry i -tého segmentu potrubí, kde $\varnothing d_i$ je průměr segmentu a L_i je délka segmentu.



Obr.12 – Schéma i -tého segmentu



Obr.13 – Schéma rozměru i -tého plechu

Stanovení rozměru a_i (rozvinutá délka plechu):

$$a_i = \pi \cdot d_i \quad [\text{m}] \quad (5.1.1.1)$$

5.1.2 Náklady na elektrody

Délka svaru :

$$L_{Si} = a_i + L_i \quad [\text{m}] \quad (5.1.2.1)$$

Hmotnost spotřebovaných elektrod u originálního potrubí:

$$m_{elk}^i = q \cdot L_{Si} \quad [\text{kg}] \quad (5.1.2.2)$$

Hmotnost spotřebovaných elektrod u varianty 1 a 2:

$$m_{elk12}^i = q \cdot a_i \quad [\text{kg}] \quad (5.1.2.3)$$

Kde: q ... hmotnost spotřeby elektrody [kg/m]

$$q = 0,41 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \quad [3, \text{s.36}]$$

Náklady na elektrody u originálního potrubí:

$$N_{ei} = f \cdot m_{elk}^i \quad [\text{Kč}] \quad (5.1.2.4)$$

Náklady na elektrody u varianty 1 a 2:

$$N_{ei12} = f \cdot m_{elk12}^i \quad [\text{Kč}] \quad (5.1.2.5)$$

Kde: f ...cena jednoho kilogramu elektrod [Kč/kg]

$$f = 96 \text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1} \quad [3, \text{s.36}]$$

5.1.3 Doba svařování

Doba svařování u originálního potrubí

$$T_{ori} = \frac{t_A \cdot \sum_{i=1}^n L_{Si}}{60} \quad [\text{hod}] \quad (5.1.3.1)$$

Doba svařování u varianty 1 a 2

$$T_{12} = \frac{t_A \cdot \sum_{i=1}^n a_i}{60} \quad [\text{hod}] \quad (5.1.3.2)$$

Kde: t_A ... normovaný čas – svařování [min/m]

$$t_A = 15 \text{min} \cdot \text{m}^{-1} \quad [3, \text{s.38}]$$

5.1.4 Mzda dělníků

Mzda dělníků u originálního potrubí

$$M_{ori} = T_{ori} \cdot N_{mzda} \quad [\text{Kč}] \quad (5.1.4.1)$$

Mzda dělníků u varianty 1 a 2

$$M_{12} = T_{12} \cdot N_{mzda} \quad [\text{Kč}] \quad (5.1.4.2)$$

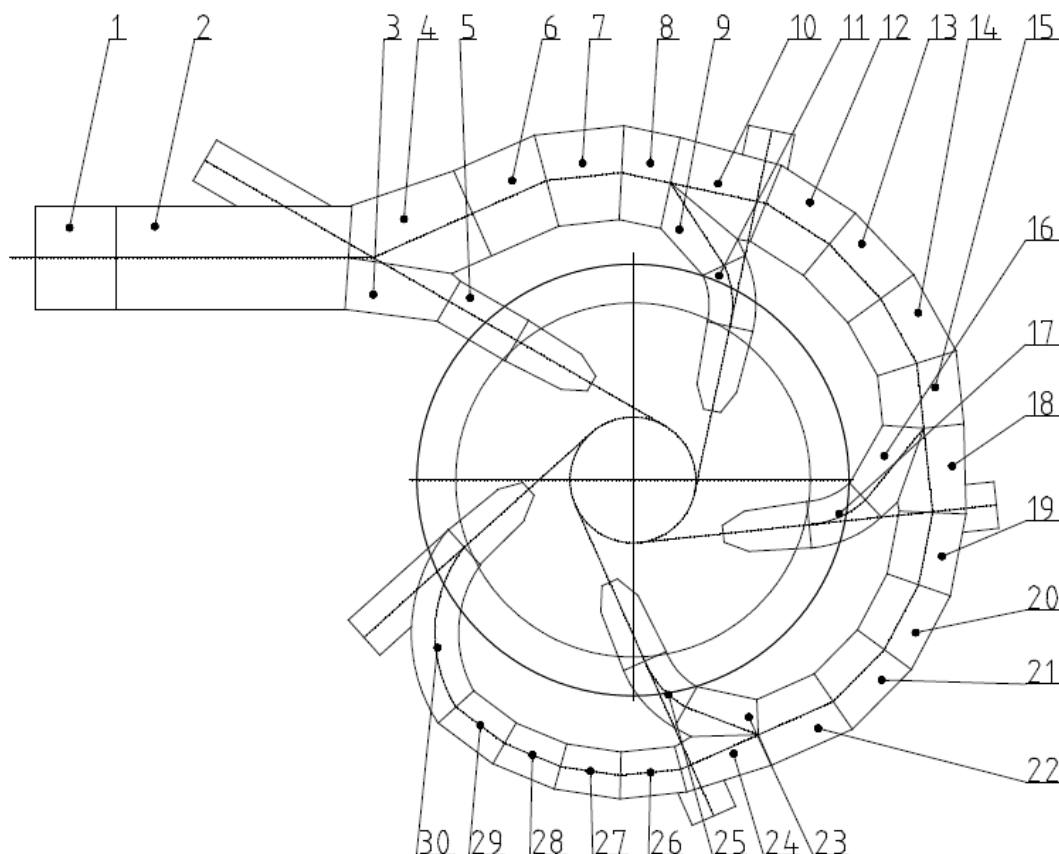
Kde: N_{mzda} ... hodinová mzda dělníků [Kč/hod]

$$N_{mzda} = 200 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$$

Po dosazení hodnot do rovnic 5.1.1.1 až 5.1.4.2, byly vypočítány orientační náklady na výrobu potrubí. Výsledné náklady byly shrnuty do následujících tabulek, kde je uvedena celková cena elektrod, mzda dělníků a nakonec doba svařování okružního potrubí. Důležitou zmínkou je také to, že náklady jsou orientační, protože jsou závislé na spotřebě elektrod (q), ceně jednoho kilogramu elektrod (f), normovaném svařovacím čase (t_A) a hodinové mzdě dělníků (N_{mzda}). Dalším faktorem, který ovlivňuje náklady, byla střední hodnota jak průměru, tak délky segmentu. V konečném důsledku, při takto zvolených hodnotách (q , f , t_A , N_{mzda}) se mohou náklady lišit $\pm 5\%$.

5.2 Originální potrubí

Originální okružní potrubí bylo rozděleno na 30 různých segmentů, které byly tvořeny skruženými nebo jinak zakřivenými plechy. Všechny rozměry byly převzaty s původního výkresu od zadávající firmy.



Obr.14 – Schéma rozdělení originálního potrubí na jednotlivé segmenty

Jak je patrné ze schématu na obrázku 14, okružní potrubí je velmi členité a žádný segment není stejný. Z tohoto důvodu je náročná technologická příprava před samotným svařováním. S počtem svarů (tedy délkou svarů), roste i mzda dělníků, kteří potrubí svařují. V tabulce 5 je spočítána celková doba svařování, která činí 17 hodin 10 minut.

Celkové náklady na elektrody	2702	Kč
Mzda dělníků	3433	Kč
Celkem	6135	Kč
Doba svařování	17hod 10min	

Tabulka 5 – Celkové náklady u originálního potrubí

Číslo segmentu	Vnitřní průměr	Délka segmentu	Délka svarů	Hmotnost spotřeby elektrody	Hmotnost spotřebovaných elektrod	Cena 1 kg elektrod	Náklady na elektrody
i	d_i	L_i	L_{Si}	q	m_{elk}^i	f	N_{ei}
	[m]	[m]	[m]	[kg/m]	[kg]	[Kč/kg]	[Kč]
1	0,825	0,64	3,23	0,41	1,33	96	127,20
2	0,825	1,848	4,44	0,41	1,82	96	174,75
3	0,4	0,8	2,06	0,41	0,84	96	80,95
4	0,78	0,86	3,31	0,41	1,36	96	130,30
5	0,37	0,625	1,79	0,41	0,73	96	70,35
6	0,74	0,642	2,97	0,41	1,22	96	116,77
7	0,74	0,6	2,92	0,41	1,20	96	115,12
8	0,74	0,397	2,72	0,41	1,12	96	107,13
9	0,64	0,775	2,79	0,41	1,14	96	109,64
10	0,37	0,55	1,71	0,41	0,70	96	67,40
11	0,37	0,498	1,66	0,41	0,68	96	65,35
12	0,641	0,6	2,61	0,41	1,07	96	102,88
13	0,595	0,6	2,47	0,41	1,01	96	97,19
14	0,589	0,6	2,45	0,41	1,00	96	96,45
15	0,519	0,6	2,23	0,41	0,91	96	87,79
16	0,37	0,73	1,89	0,41	0,78	96	74,48
17	0,37	0,498	1,66	0,41	0,68	96	65,35
18	0,525	0,65	2,30	0,41	0,94	96	90,50
19	0,525	0,585	2,23	0,41	0,92	96	87,94
20	0,525	0,585	2,23	0,41	0,92	96	87,94
21	0,525	0,578	2,23	0,41	0,91	96	87,67
22	0,525	0,652	2,30	0,41	0,94	96	90,58
23	0,37	0,6	1,76	0,41	0,72	96	69,37
24	0,375	0,675	1,85	0,41	0,76	96	72,94
25	0,37	0,498	1,66	0,41	0,68	96	65,35
26	0,375	0,482	1,66	0,41	0,68	96	65,34
27	0,375	0,482	1,66	0,41	0,68	96	65,34
28	0,375	0,482	1,66	0,41	0,68	96	65,34
29	0,375	0,482	1,66	0,41	0,68	96	65,34
30	0,375	1,353	2,53	0,41	1,04	96	99,62
			Σ68,66				Σ2702,40

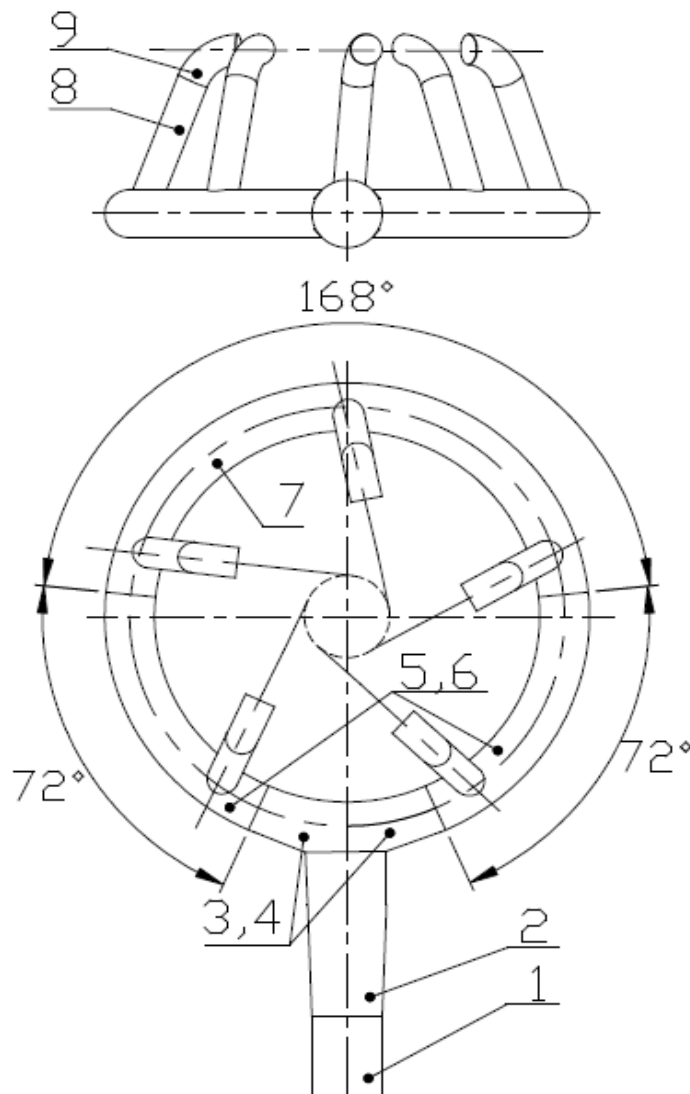
Tabulka 6 – Výpočet jednotlivých segmentů originálního potrubí

Normovaný čas	t_A	15	min/m	
Doba svařování	T	17,16	hod	17hod 10min
Hodinová mzda dělníků	N_{mzda}	200	Kč/hod	
Mzda dělníků	M_{ori}	3432,93	Kč	

Tabulka 7 – Výpočet nákladů originálního potrubí

5.3 Varianta 1

Zjednodušené potrubí má výhodu v tom, že má konstantní průměry a lze jej rozdělit na méně úseků. Velmi zjednodušeně bylo zde pojato rozvětvení v okružním potrubí, které je náročné na výrobu.



Obr.15 – Schéma rozdělení potrubí Varianty 1 na jednotlivé potrubí

V následující tabulce lze vidět, jak se doba svařování snížila na 5 hodin a 3 minuty, což bylo o 70% méně než u originální potrubí. Z toho vyplývá, že i ostatní náklady na výrobu okružního potrubí se snížily.

Celkové náklady na elektrody	1375	Kč
Mzda dělníků	1013	Kč
Celkem	2388	Kč
Doba Svařování	5hod 3min	

Tabulka 8 – Celkové náklady u varianty 1

Číslo segmentu	Vnitřní průměr	Délka svarů	Hmotnost spotřeby elektrody	Hmotnost spotřebovaných elektrod	Cena 1 kg elektrod	Náklady na elektrody
i	d_i	L_{Si}	q	m_{elk12}^i	f	N_{ei12}
	[m]	[m]	[kg/m]	[kg]	[Kč/kg]	[Kč]
1	0,825	2,59	0,41	1,06	96	102,01
2	0,952	2,99	0,41	1,23	96	117,72
3	0,584	3,67	0,41	1,50	96	144,43
4	0,584	1,83	0,41	0,75	96	72,21
5	0,584	1,83	0,41	0,75	96	72,21
6	0,584	1,83	0,41	0,75	96	72,21
7	0,584	1,83	0,41	0,75	96	72,21
8	0,584	1,83	0,41	0,75	96	361,07
9	0,584	1,83	0,41	0,75	96	361,07
		Σ20,26				Σ1375,15

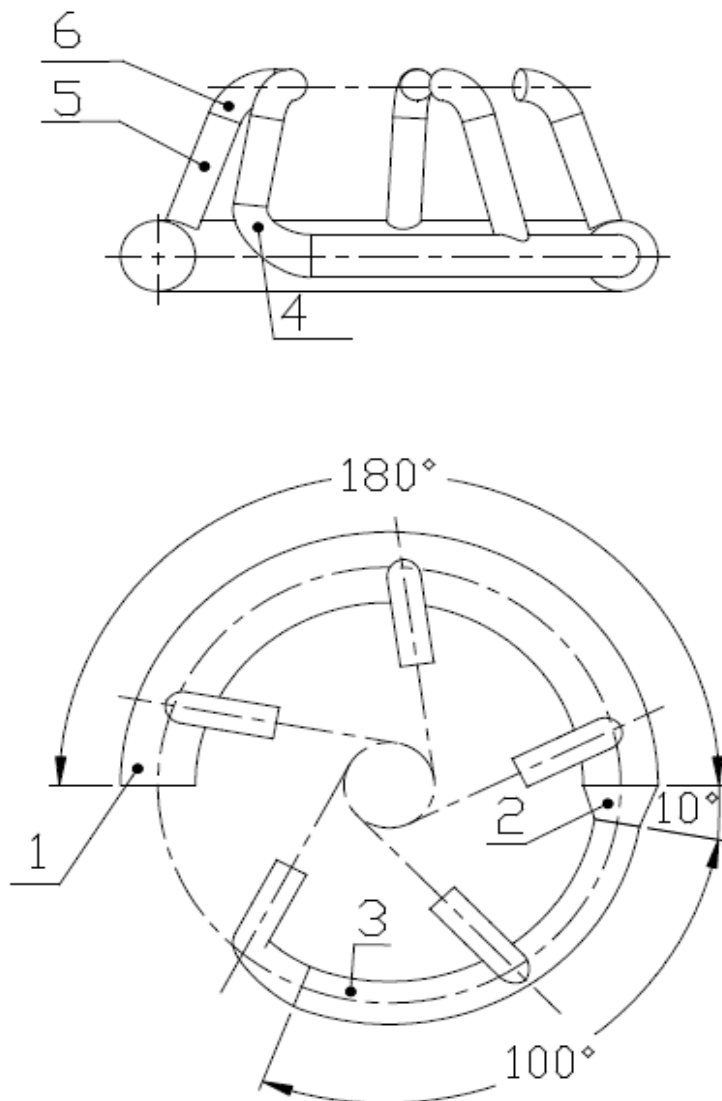
Tabulka 9 – Výpočet jednotlivých úseků potrubí varianty 1

Normovaný čas	t_A	15	min/m	
Doba svařování	T_{12}	5,07	hod	5hod 3min
Hodinová mzda dělníků	N_{mzda}	200	Kč/hod	
Mzda dělníků	M_{12}	1013,01	Kč	

Tabulka 10 – Výpočet nákladů varianty 1

5.4 Varianta 2

Tato varianta okružního potrubí má ještě méně úseků potrubí než předchozí varianta 1.



Obr.16 – Schéma rozdělení potrubí Varianty 2 na jednotlivé potrubí

Oproti předchozím dvěma variantám, mělo tato varianta ještě nižší náklady na dobu svařování. Je patrné, že doba svařování je o 55% kratší než u varianty 1. To bylo způsobeno tím, že zde není rozvětvení, které se napojovalo na okružní potrubí.

Celkové náklady na elektrody	500	Kč
Mzda dělníků	461	Kč
Celkem	961	Kč
Doba Svařování	2hod 18min	

Tabulka 11 – Celkové náklady u varianty 2

Číslo segmentu	Vnitřní průměr	Délka svarů	Hmotnost spotřeby elektrody	Hmotnost spotřebovaných elektrod	Cena 1 kg elektrod	Náklady na elektrody
i	d_i	L_{Si}	q	m_{elk12}^i	f	N_{ei12}
	[m]	[m]	[kg/m]	[kg]	[Kč/kg]	[Kč]
1	0,825	2,59	0,41	1,06	96	102,01
2	0,5	1,57	0,41	0,64	96	61,83
3	0,5	1,57	0,41	0,64	96	61,83
4	0,37	1,16	0,41	0,48	96	45,75
5	0,37	1,16	0,41	0,48	96	183,01
6	0,37	1,16	0,41	0,48	96	45,75
		Σ9,22				Σ500,18

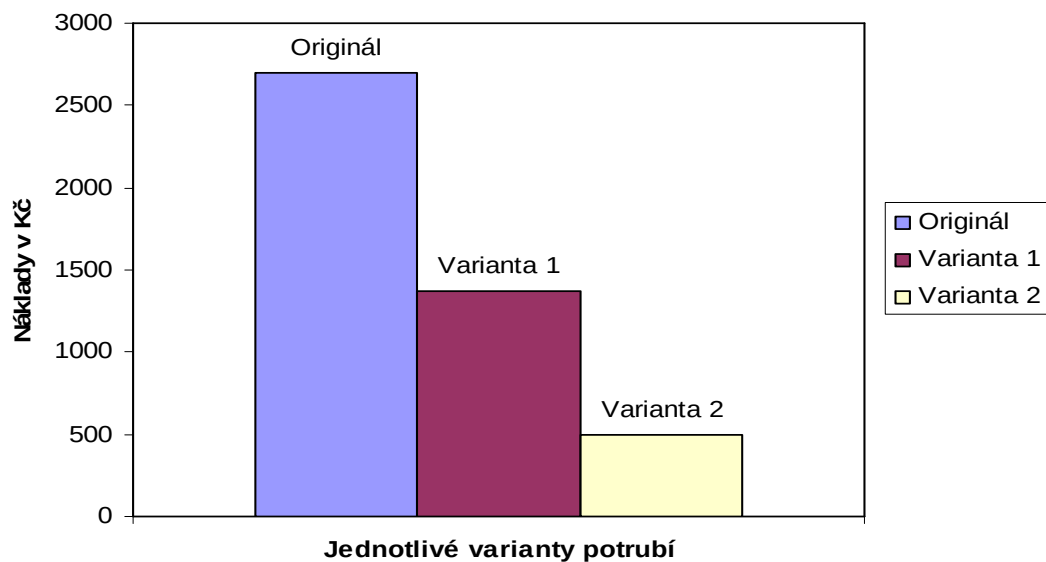
Tabulka 12 – Výpočet jednotlivých úseků potrubí varianty 2

Normovaný čas	t_A	15	min/m	
Doba svařování	T_{12}	2,31	hod	2hod 18min
Hodinová mzda dělníků	N_{mzda}	200	Kč/hod	
Mzda dělníků	M_{12}	461,03	Kč	

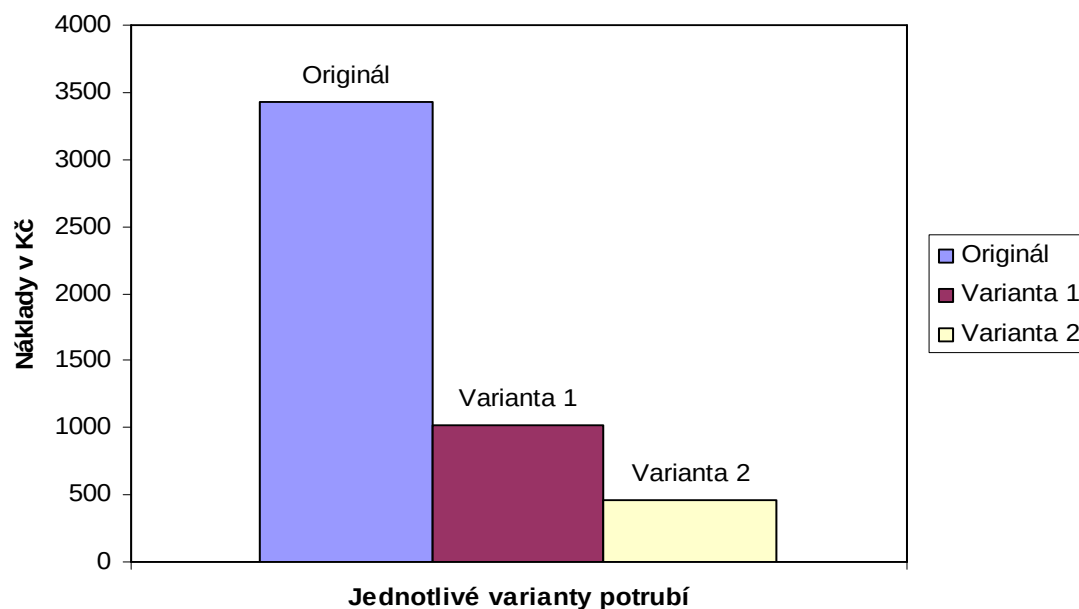
Tabulka 13 – Výpočet nákladů varianty 2

5.5 Grafické porovnání nákladů

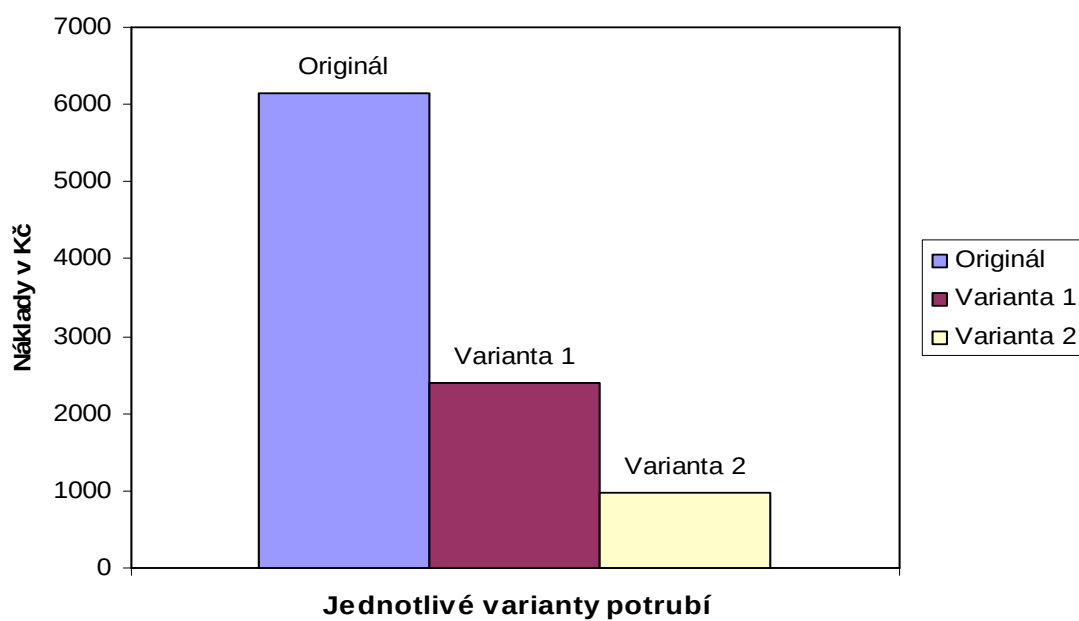
Celkové náklady na elektrody



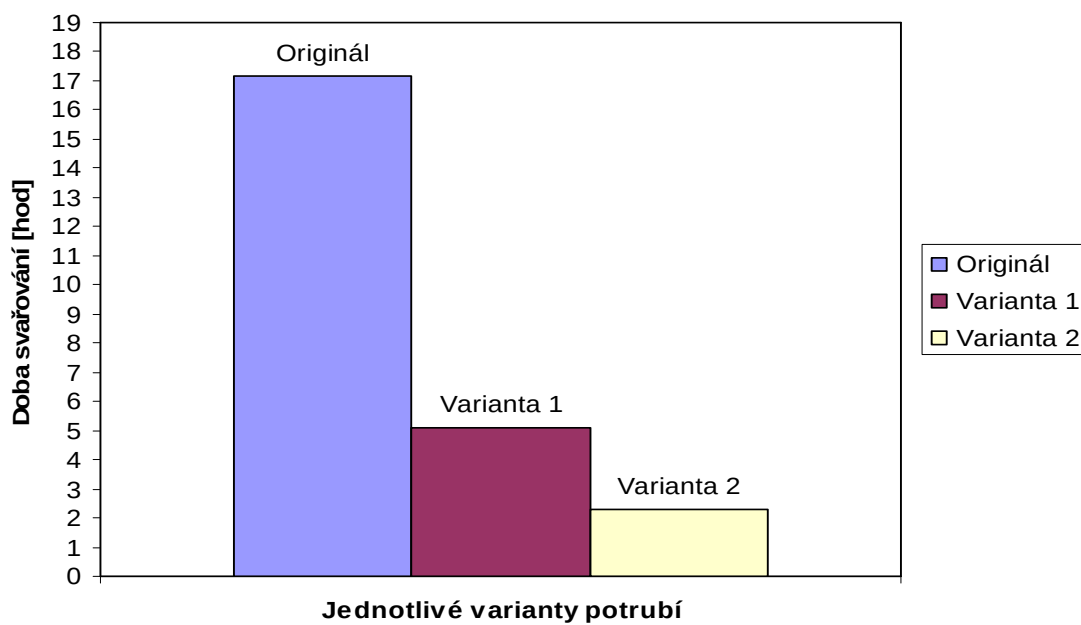
Mzda dělníků



Celkové náklady na svařování



Doba svařování



6. ZÁVĚR

Při optimalizaci okružního potrubí pro pětídýzovou Peltonovu turbínu bylo nutno zhodnotit jak hydraulické, tak i ekonomické hledisko. Obě tato hlediska jsou důležitou součástí výroby každého hydraulického zařízení. Je potřebné si uvědomit, že dané zařízení či hydraulický prvek je nutné nejen optimálně navrhnout či spočítat, ale také vyrobit.

Z hydraulického hlediska, dle rozboru jednotlivých variant, je zřejmé, že jako nejlepší se jevila varianta 1. Tato varianta má sice nerovnoměrný průtok na jednotlivých dýzách, ale postupnou úpravou bylo dosaženo téměř stejného průtoku na čtyřech dýzách. Takto navržená geometrie se zúžením průměru za první resp. pátou dýzou, je mnohem jednodušší než stávající originální okružní potrubí. Pro další optimalizaci variant 1, 1A a 1B by na základě dosažených výsledků bylo vhodné zaměřit se na optimální průměr okružního prstence potrubí tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného průtoku na jednotlivých dýzách. V optimálním případě by bylo vhodné zvýšit průtok na první, resp. páté a druhé, resp. čtvrté dýze a zároveň snížit průtok na třetí dýze. U variant 2 a 2A je z dřívějších výpočtů zřejmé, že je nezbytné za každou dýzou snížit průměr potrubí, aby se proud vody stabilizoval a zároveň urychlil, neboť při stejném průměru potrubí průtok na jednotlivých dýzách narůstá. Všechny takto vypočítané výsledky je nutné ověřit experimentem, kterým by bylo možné ověřit vypočtené průtoky a statické tlaky v jednotlivých variantách okružního potrubí pro pětídýzovou Peltonovu turbínu.

Ekonomické hledisko jasně vypovídá, že nejnáročnější na výrobu je originální přívodní potrubí. Pro ekonomické porovnání bylo zvoleno originální potrubí a variant 1 a 2. Varianty 1A, 1B a 2A by mírně navýšily náklady na výrobu (kuželová část potrubí, tedy přechod z většího průměru na menší). Ze zjednodušených ekonomických propočtů vyplývá, že značná úspora byla jak u svařovacího materiálu, tak i kratší doby svařování. Náklady na mzdy dělníků a doba svařování jsou na sobě závislé. Zjednodušení přispělo ke snížení doby, po kterou je nutno svařovat potrubí, a to z původních 17 hodin a 10 minut (originální potrubí) na 2 hodiny a 18 minut (varianta 2), což znamenalo snížení o 86%. Na druhou stranu nebyly počítány náklady na materiál jednotlivých potrubí a byly zde pouze učiněny zjednodušující předpoklady.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NECHLEBA, Miroslav . Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství. 2.rozšířené vydání. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 672 s.
- [2]HIMR, D. *Návrh zjednodušeného okružního potrubí Peltonovy turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.
- [3]HALABRIN, R. *Okružní potrubí Peltonovy turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.
- [4] VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method. Second Edition. Essex, England: Prentice Hall, 1995. 503 s. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [5] ŠOB, F. *Hydromechanika*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 2002. 238 s.
- [6] FLUENT 6.3 User's Guide [online]. 2006 [cit. 2011-04-16]. ANSYS FLUENT 6.3 Documentation. Dostupné z WWW: <<http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluvent6.3/help/pdf/ug/flug.pdf>>.
- [7] GAMBIT 2.2. Tutorial Guide [online]. September 2004 [cit. 2011-04-16]. GAMBIT 2.2. Tutorial Guide. Dostupné z WWW: <<http://vincent.chapin.free.fr/Cours%20CFD/Doc/gambit-2.2-tutorials.pdf>>.
- [8] Pelton wheel. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 27 December 2001, last modified on 2 April 2011 [cit. 2011-04-17]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pelton_wheel>.
- [9] Vaphydro [online]. 16.07.2010 [cit. 2011-04-17]. Vaphydro/news. Dostupné z WWW: <<http://www.vaphydro.bg/images/upload/news/2010-07-16-10-06-45-pelton-2jet-3d.jpg>>.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Význam symbolu	Jednotka
a_i	Rozvinutá délka plechu	m
d	Průměr potrubí	m
d_i	Střední hodnota průměru segmentu potrubí	m
f	Cena jednoho kilogramu elektrod	Kč.kg ⁻¹
h	Umístění výstupní dýz nad rovinou okružního potrubí	m
$\dot{m}$	Hmotnostní tok	kg.s ⁻¹
m_{elk}^i	Hmotnost spotřebovaných elektrod u originálního potrubí	kg
m_{elk12}^i	Hmotnost spotřebovaných elektrod u varianty 1 a 2	kg
n	Počet dýz	1
$n_{11\text{opt}}$	Optimální jednotkové otáčky	min ⁻¹
p_i	Tlak působící na jeden element ve výpočetní síti	Pa
p_{stat}	Statický tlak	Pa
q	Hmotnost spotřebovaných elektrod	kg.m ⁻¹
t_A	Normovaný čas - svařování	min.m ⁻¹
v	Rychlost	m.s ⁻¹
v_n	Normálová složka rychlosti	m.s ⁻¹
v_s	Střední rychlost	m.s ⁻¹

Symbol	Význam symbolu	Jednotka
D	Roztečný průměr oběžného kola	m
D_0	Vstupní průměr potrubí	m
D_1	Výstupní průměr potrubí	m
D_{odb}	Průměr odbočnice	m
H	Spád na turbínu	m
L_i	Střední hodnota délky segmentu potrubí	m
L_{si}	Délka svaru	m
M_{12}	Mzda dělníků u varianty 1 a 2	Kč
M_{ori}	Mzda dělníků u originálního potrubí	Kč
N_{ei}	Náklady na elektrody u originálního potrubí	Kč
N_{ei12}	Náklady na elektrody u varianty 1 a 2	Kč
N_{mzda}	Hodinová mzda dělníků	Kč.hod ⁻¹
Q	Průtok	m ³ .s ⁻¹

Q_1	Průtok první dýzou	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_2	Průtok druhou dýzou	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_3	Průtok třetí dýzou	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_4	Průtok čtvrtou dýzou	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_5	Průtok pátou dýzou	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_{11\text{opt}}$	Optimální jednotkový průtok na jednu dýzu	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_v	Vstupní průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
R_{prst}	Poloměr zakřivení prstence	m
S	Plocha průřezu	m^2
S_i	Plocha jednoho elementu na výpočetní síti	m^2
T_{12}	Doba svařování u varianty 1 a 2	hod
T_{ori}	Doba svařování u originálního potrubí	hod

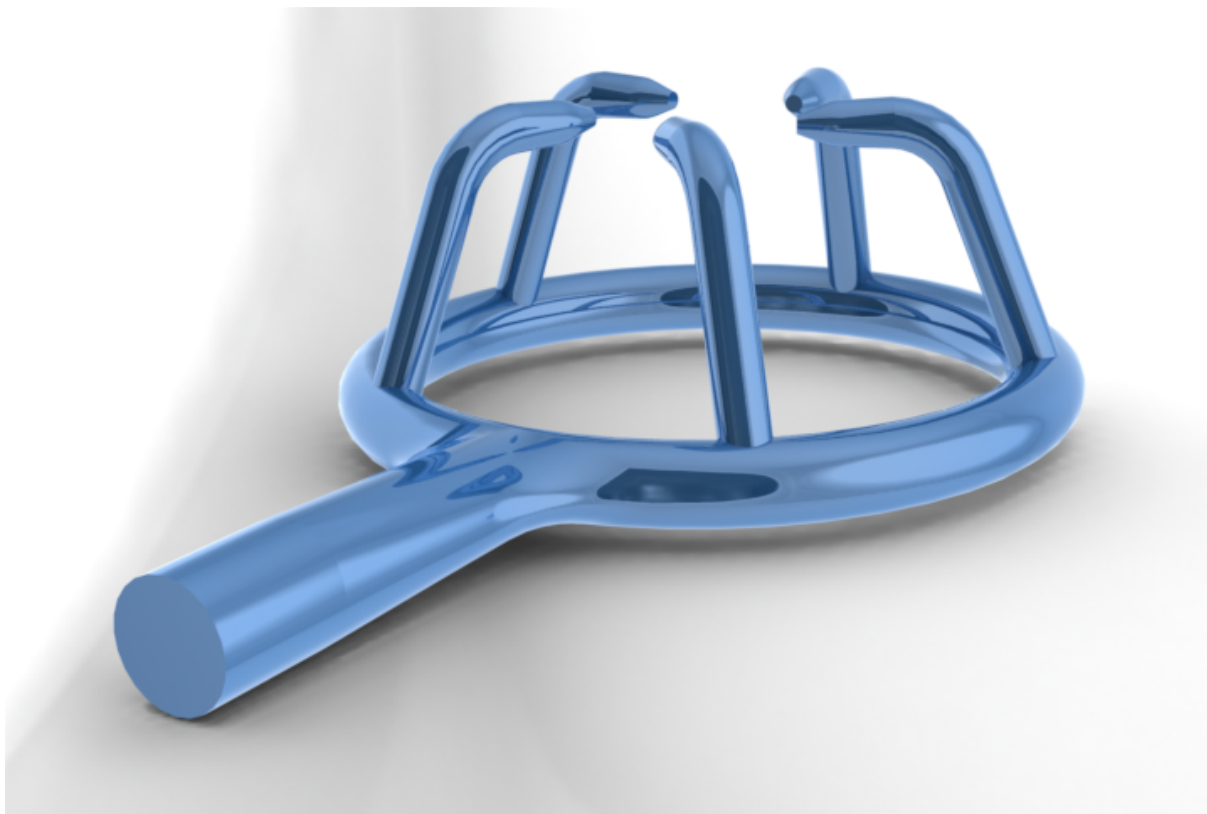
Symbol	Význam symbolu	Jednotka
α	Coriolisovo číslo	1
η	Účinnost turbíny	1
π	Ludolfovo číslo	1
ρ	Hustota vody	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ψ	Umístění první odbočnice	°

Index	Význam indexu
i	Sčítací index
max	Maximální
min	Minimální

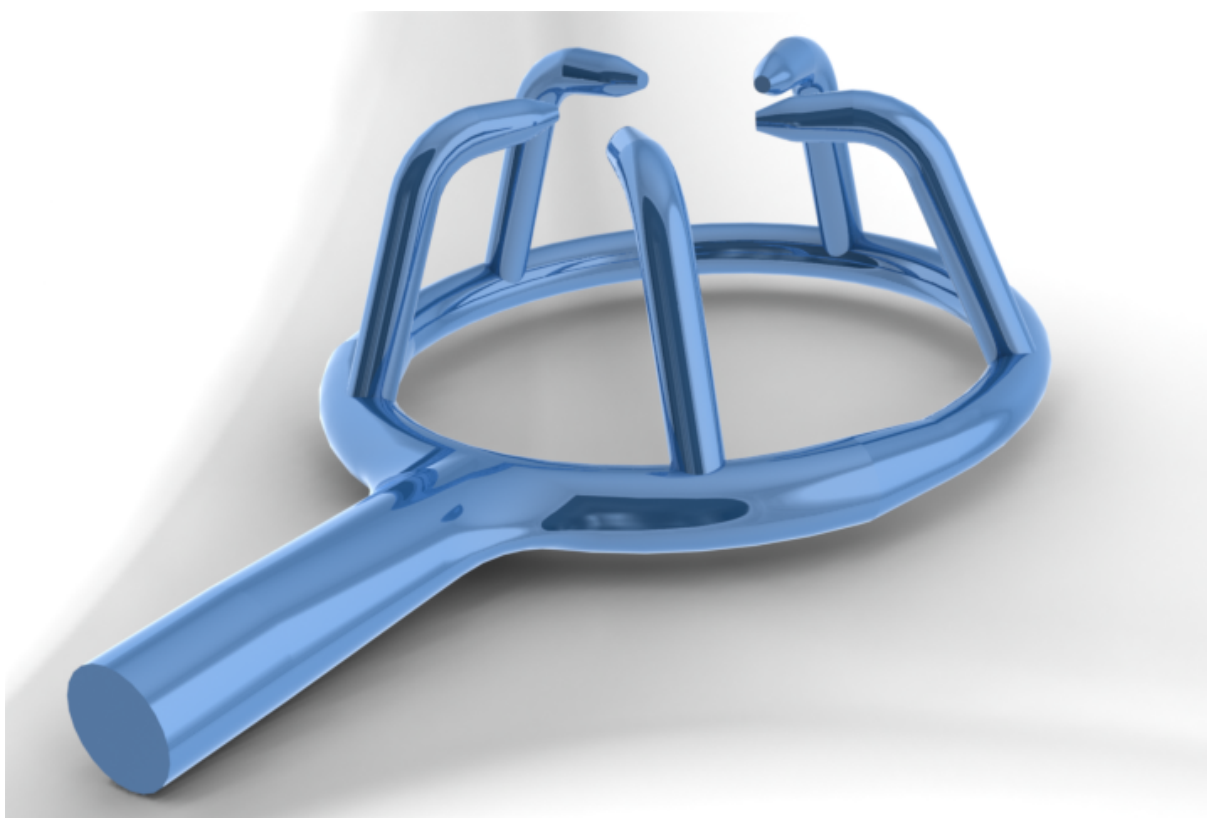
9. SEZNAM PŘÍLOH

Obr. 17 – Model Varianta 1	55
Obr. 18 – Model Varianta 1A	55
Obr. 19 – Model Varianta 1B	56
Obr. 20 – Model Varianta 2	56
Obr. 21 – Model Varianta 2A	57
Obr. 22 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 1	57
Obr. 23 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 1A	58
Obr. 24 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 1B	58
Obr. 25 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 2	59
Obr. 26 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 2A	59
Obr. 27 – Proudnice-Varianta 1	60
Obr. 28 – Proudnice-Varianta 1A	60
Obr. 29 – Proudnice-Varianta 1B	61
Obr. 30 – Proudnice-Varianta 2	61
Obr. 31 – Proudnice-Varianta 2A	62
Obr. 32 – Vektory rychlosti-Varianta 1	62
Obr. 33 – Vektory rychlosti-Varianta 1A	63
Obr. 34 – Vektory rychlosti-Varianta 1B	63
Obr. 35 – Vektory rychlosti-Varianta 2	64
Obr. 36 – Vektory rychlosti-Varianta 2A	64

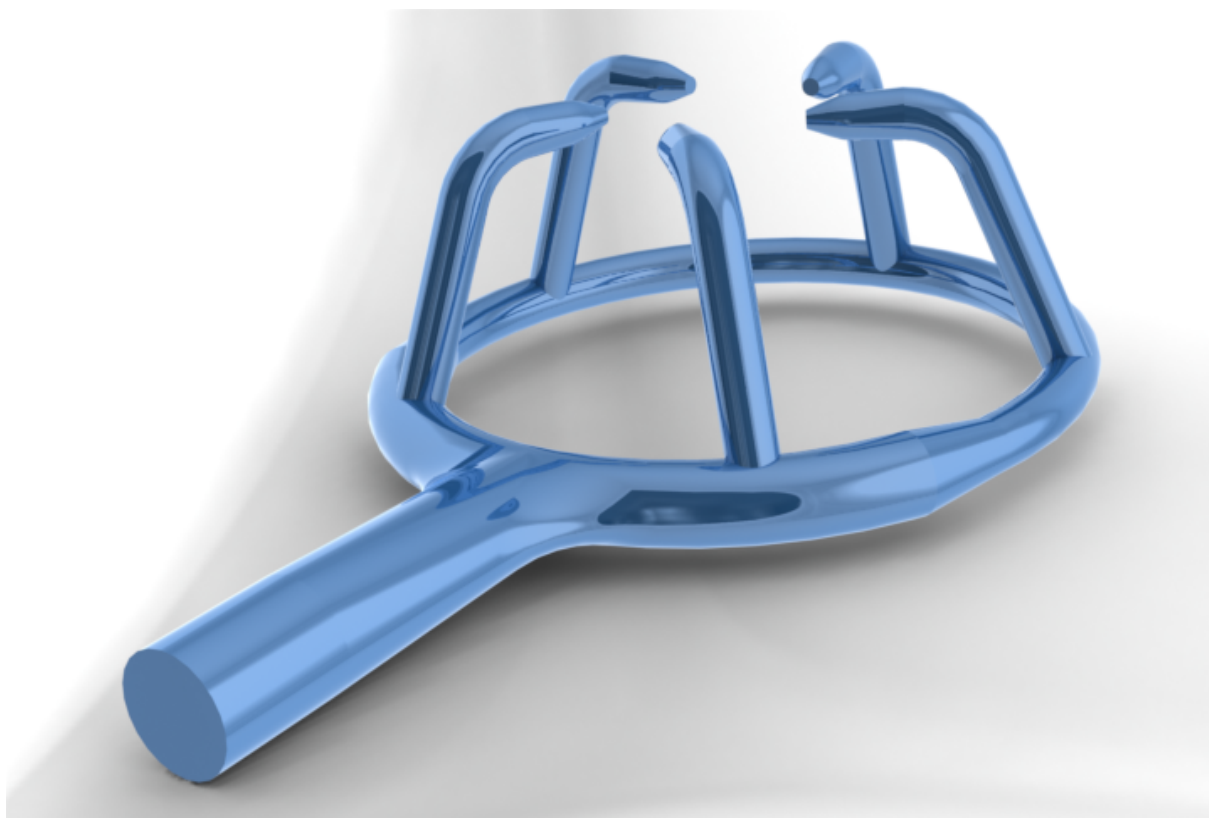
10. PŘÍLOHY



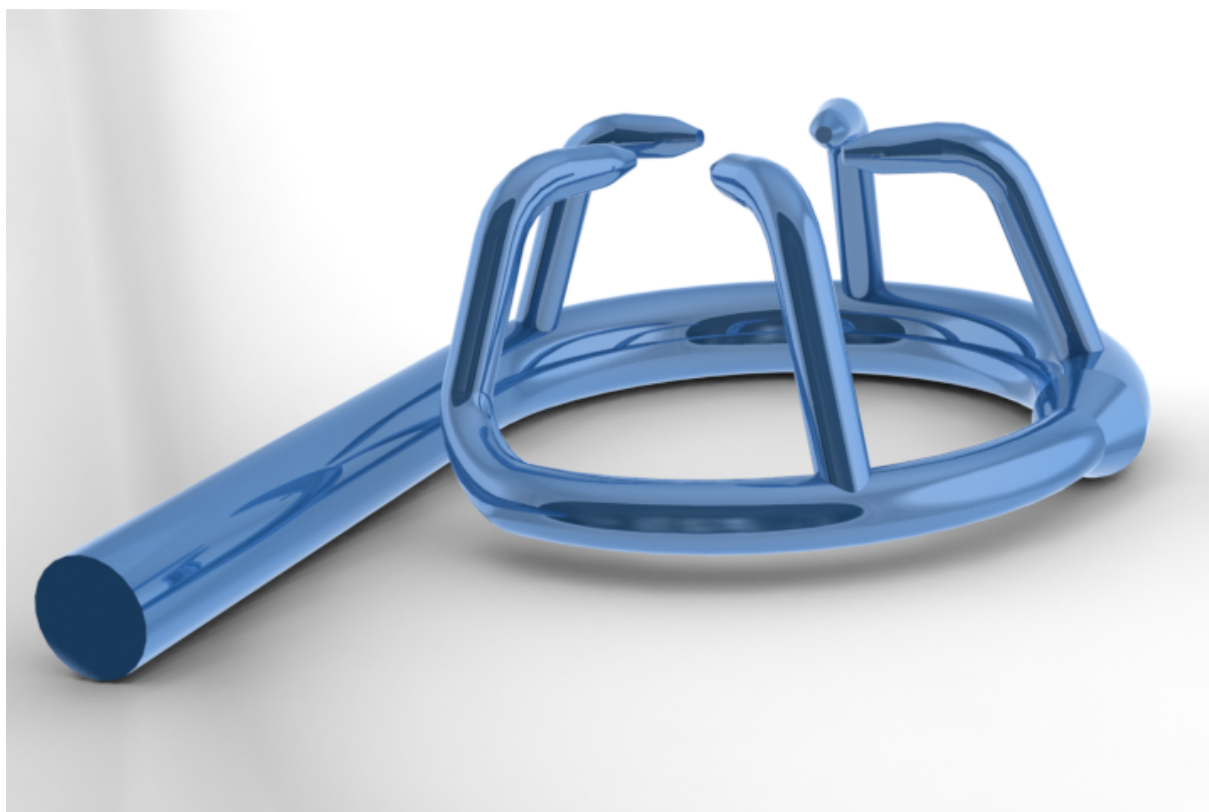
Obr. 17 – Model Varianty 1



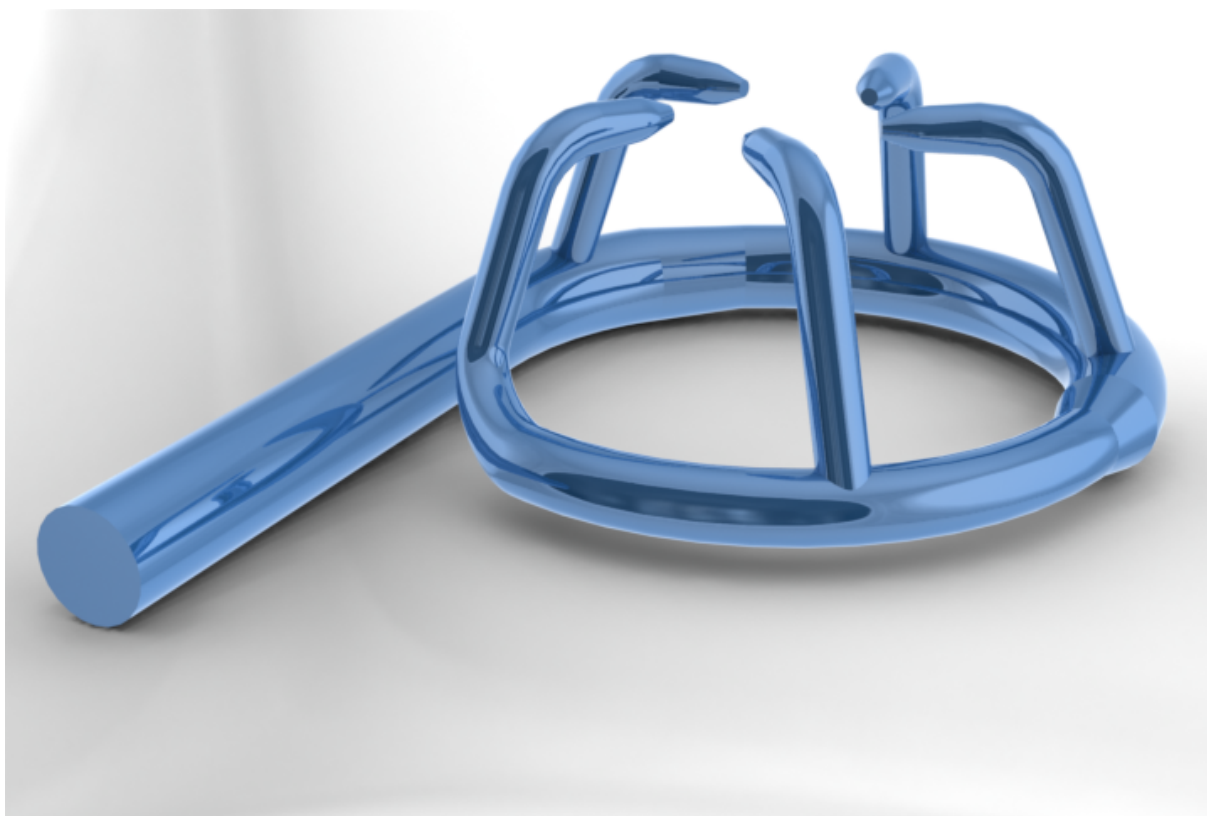
Obr. 18 – Model Varianty 1A



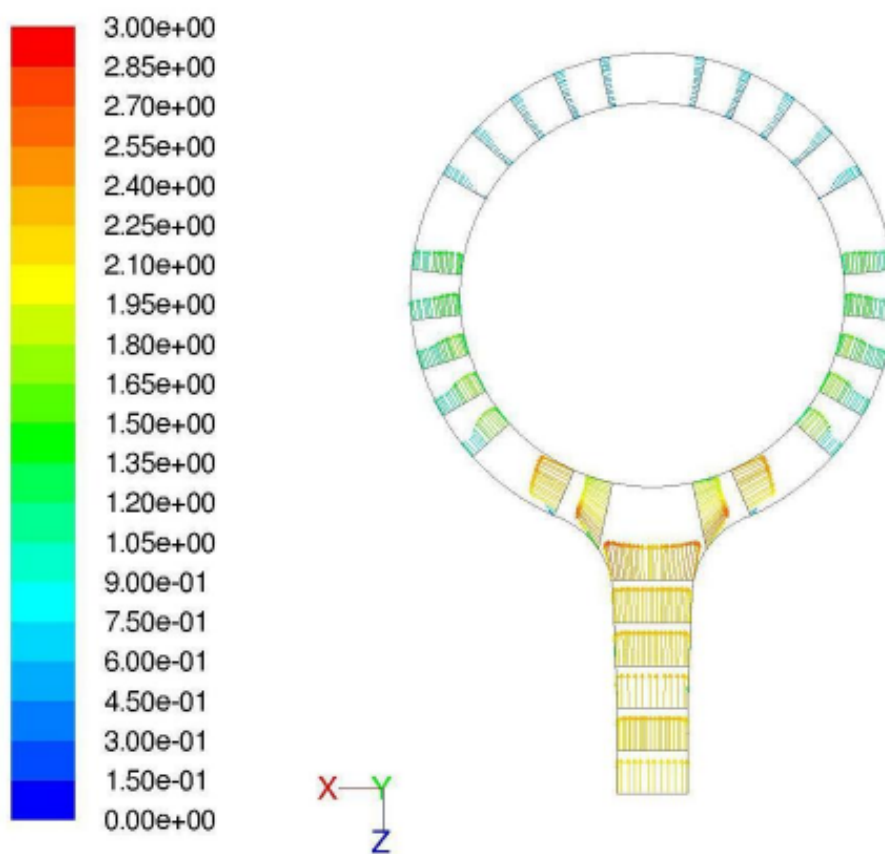
Obr. 19 – Model Varianty 1B



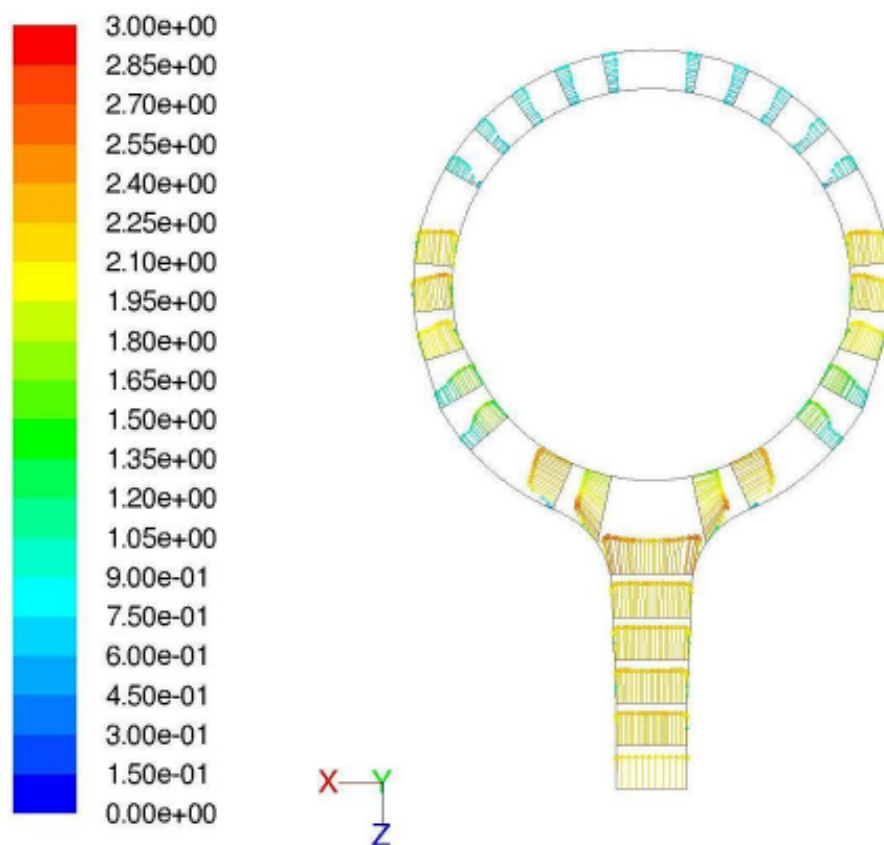
Obr. 20 – Model Varianty 2



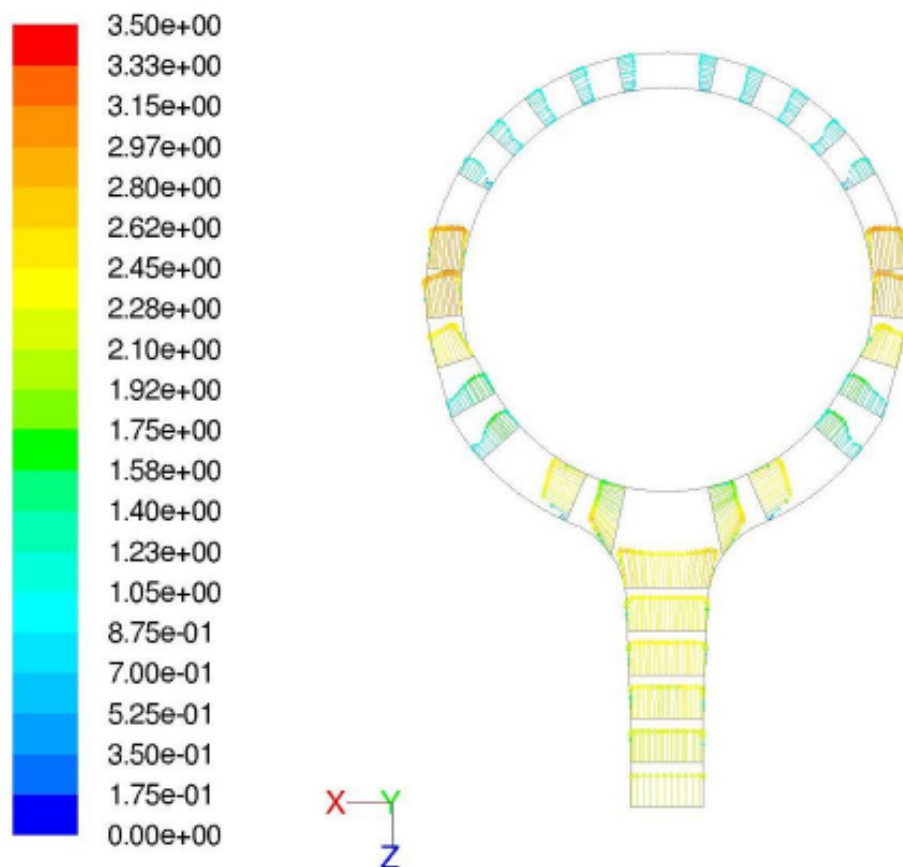
Obr. 21 – Model Varianty 2A



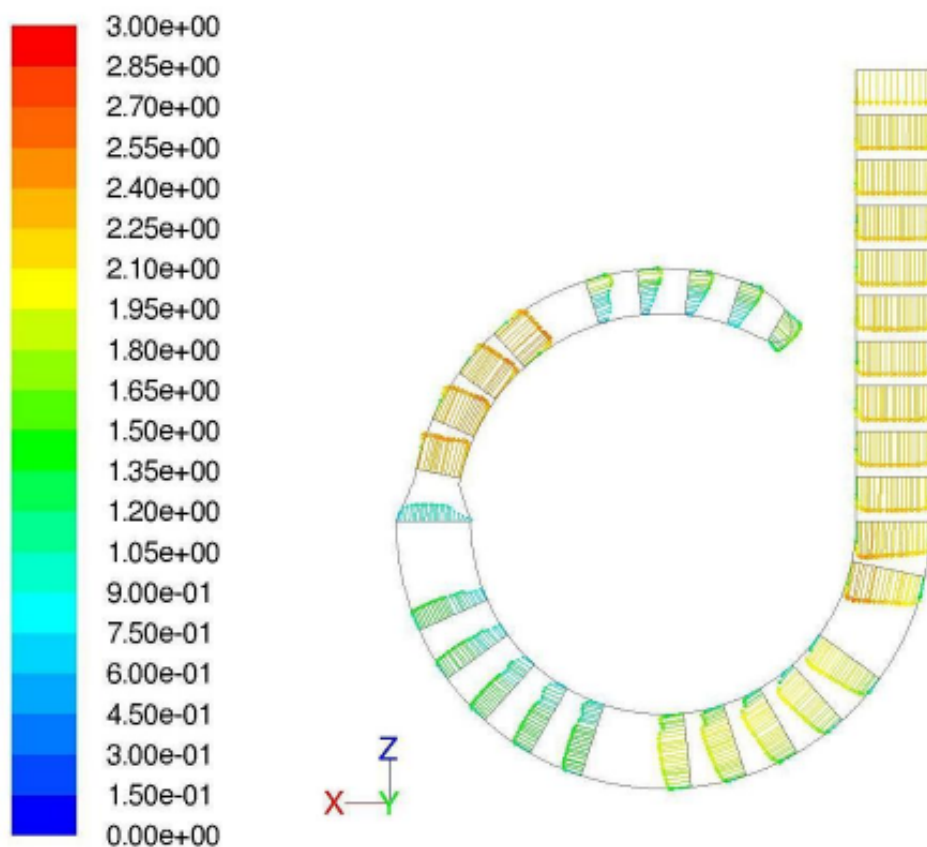
Obr. 22 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 1



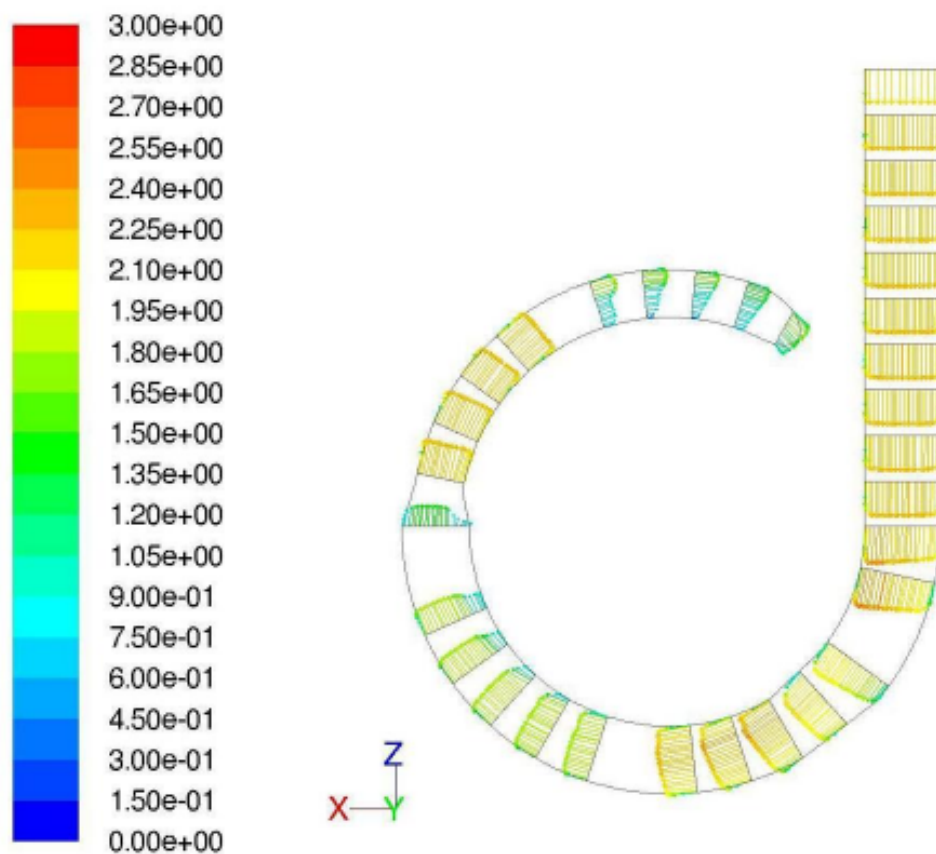
Obr. 23 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 1A



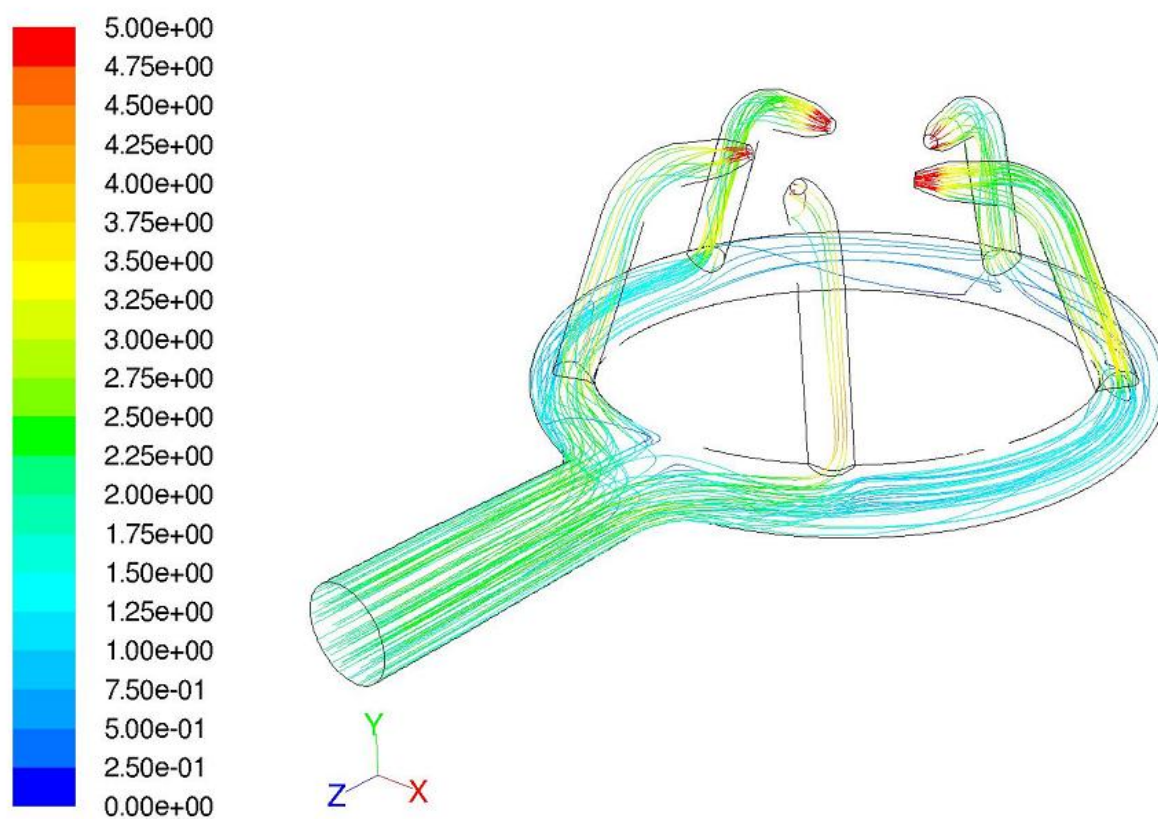
Obr. 24 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 1B



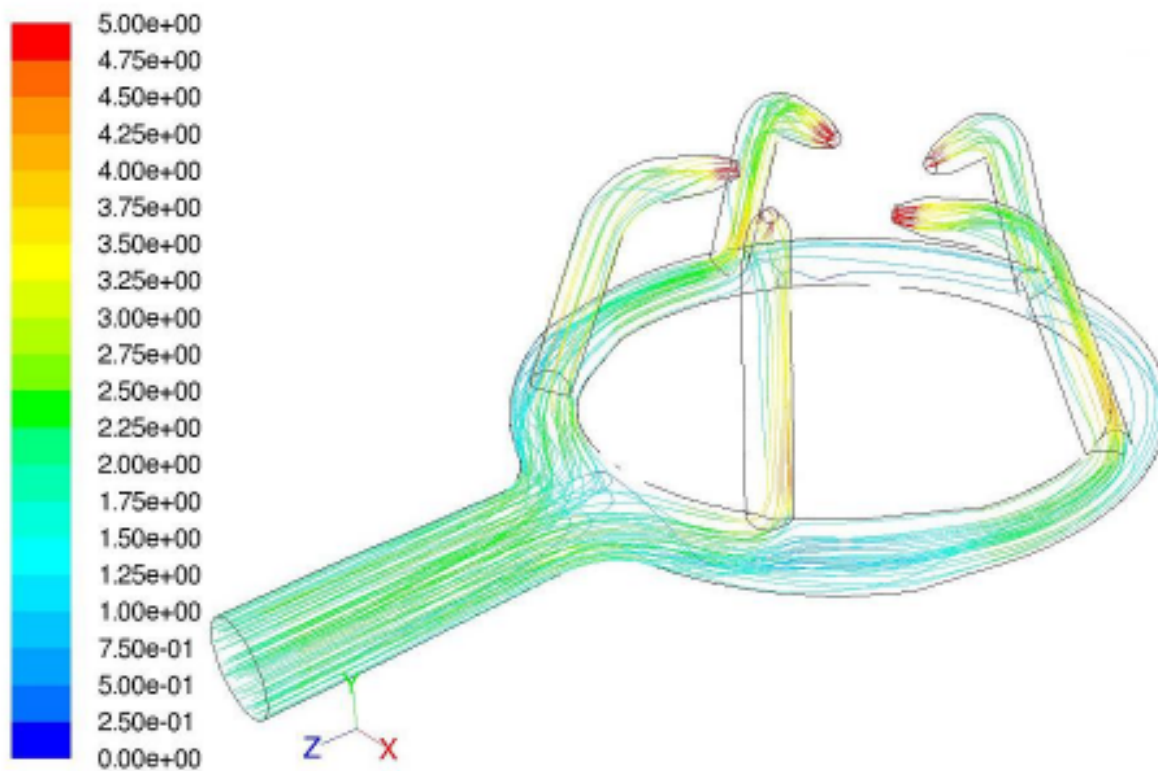
Obr. 25 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 2



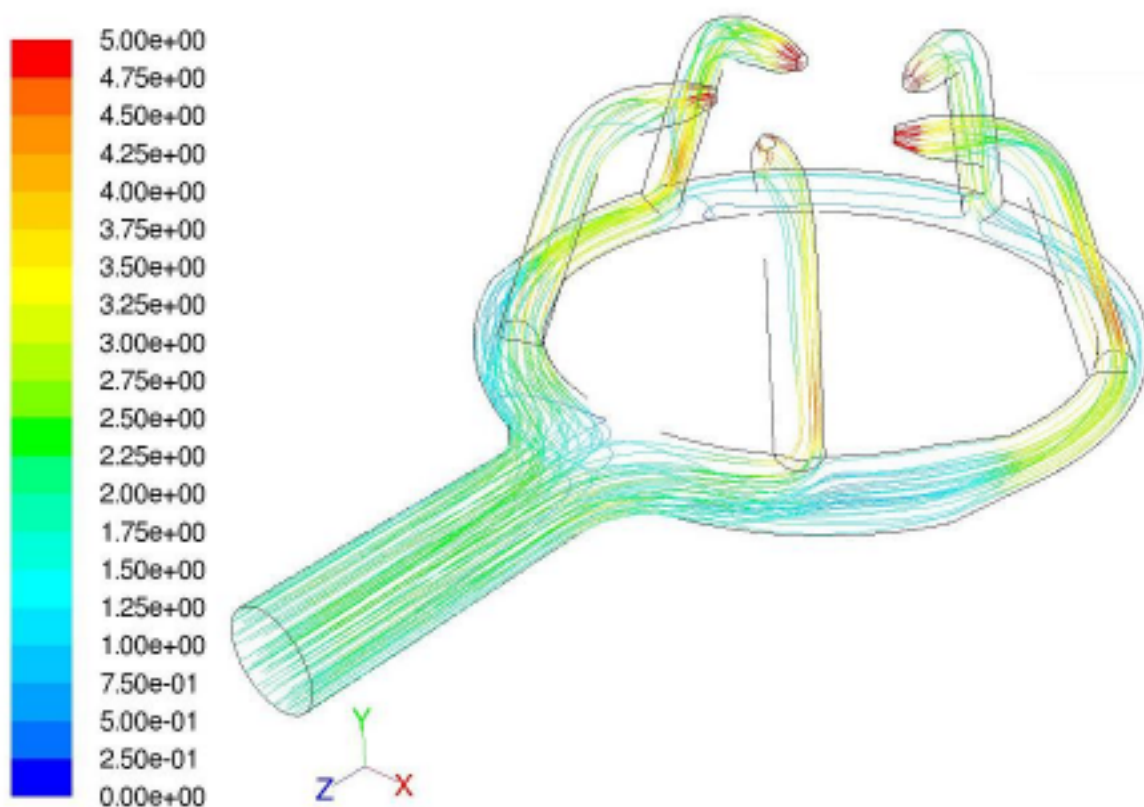
Obr. 26 – Vývoj rychlostního profilu u Varianty 2A



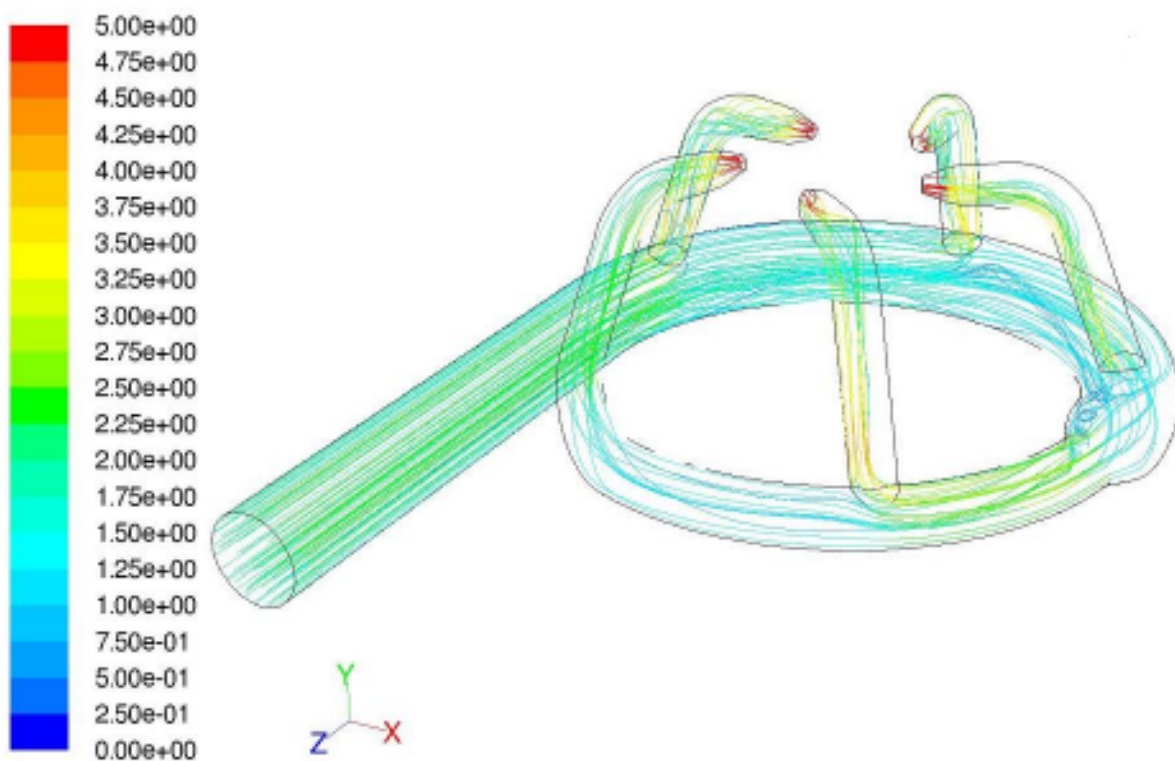
Obr. 27 – Proudnice-Varianta 1



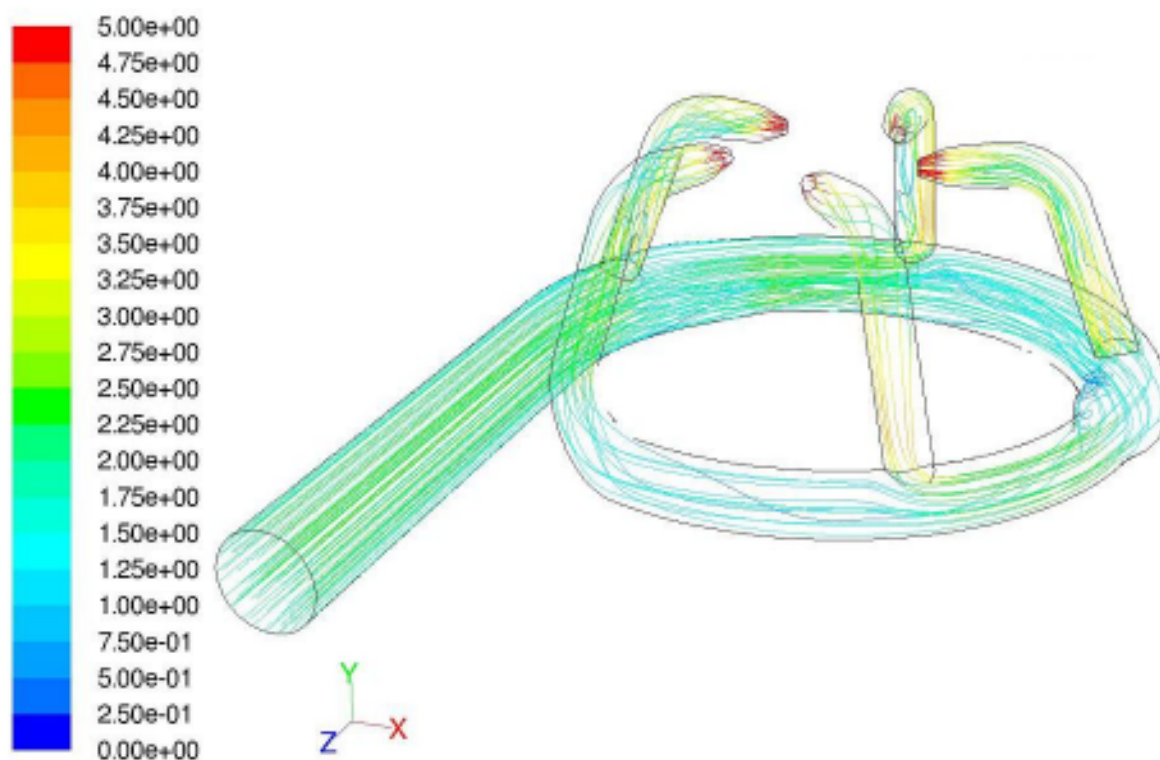
Obr. 28 – Proudnice-Varianta 1A



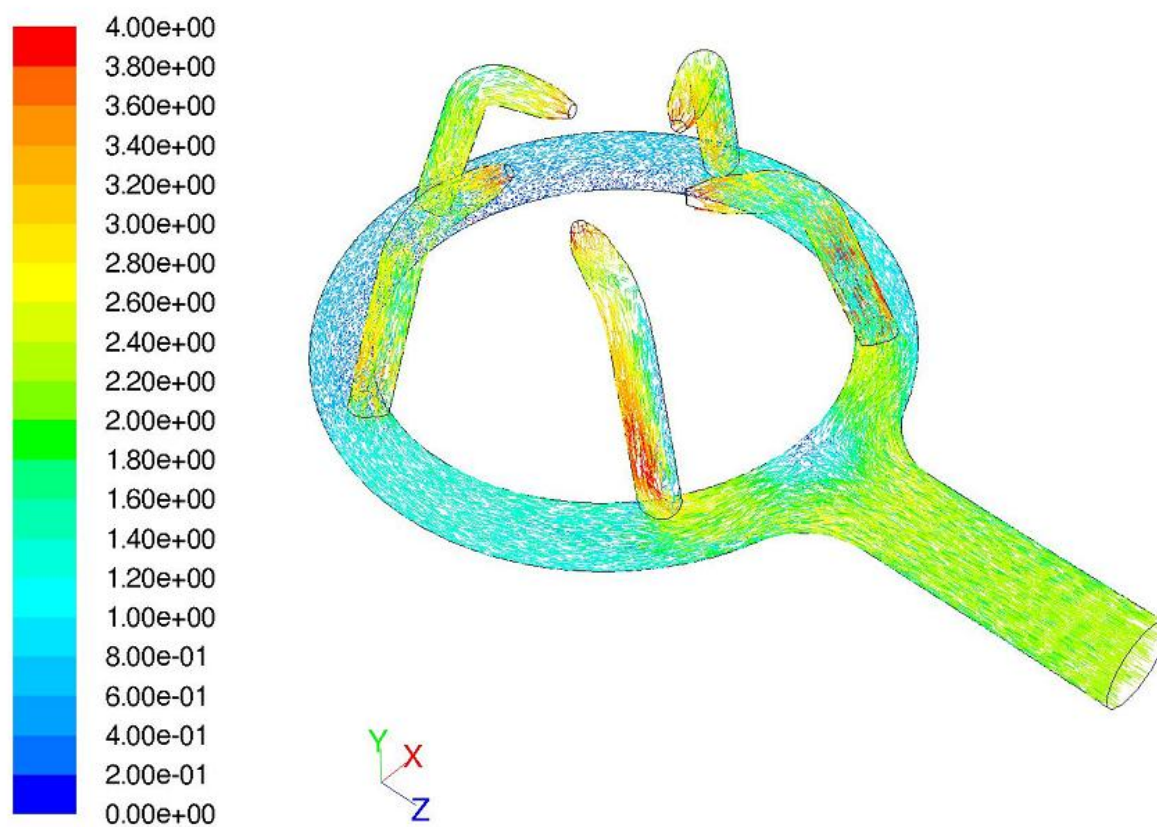
Obr. 29 – Proudnice-Varianta 1B



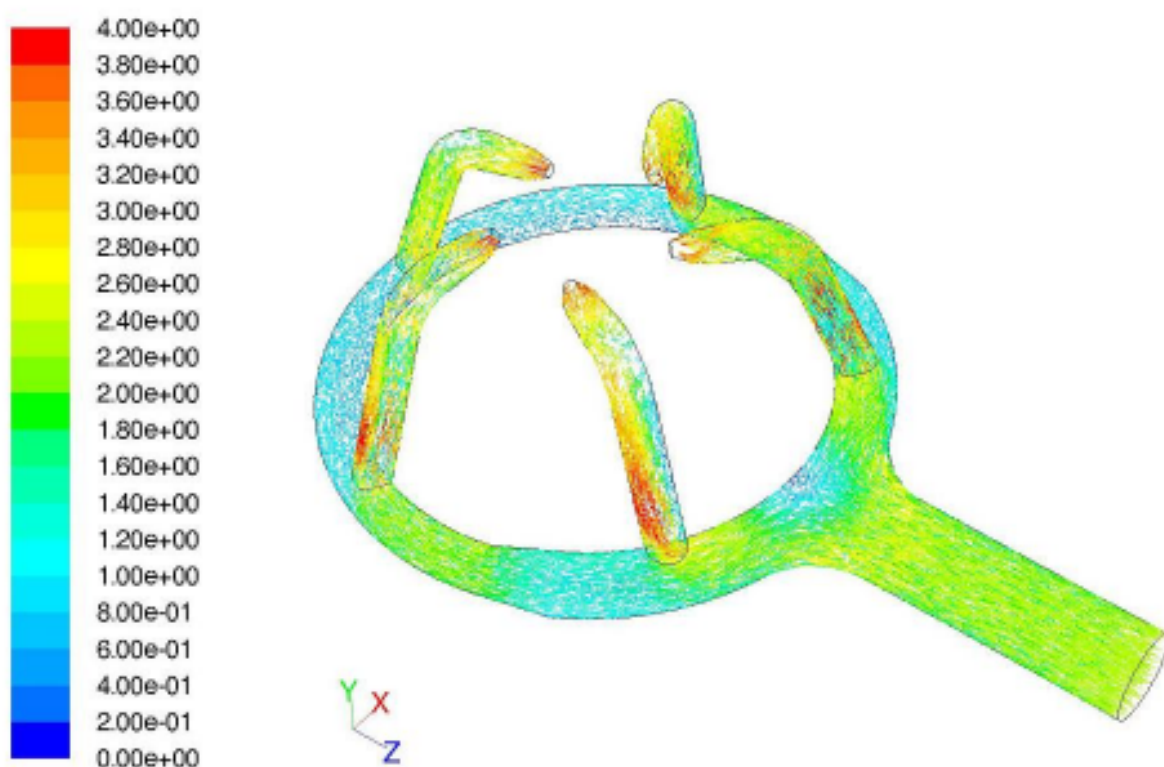
Obr. 30 – Proudnice-Varianta 2



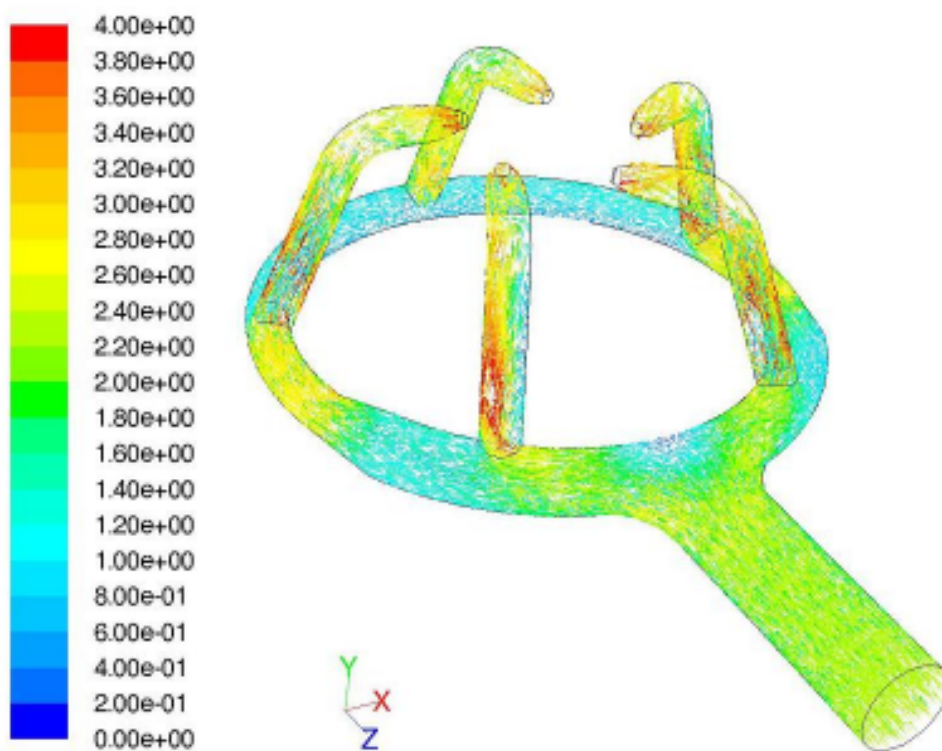
Obr. 31 – Proudnice-Varianta 2A



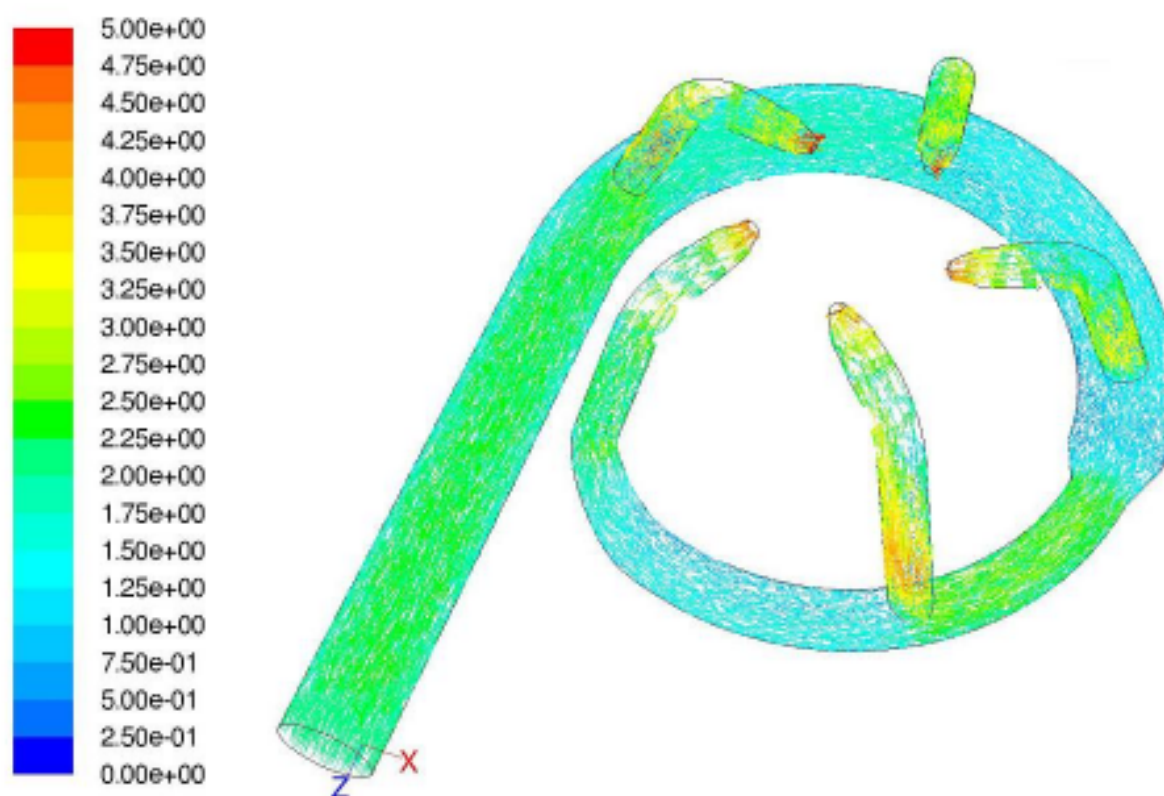
Obr. 32 – Vektory rychlosti-Varianta 1



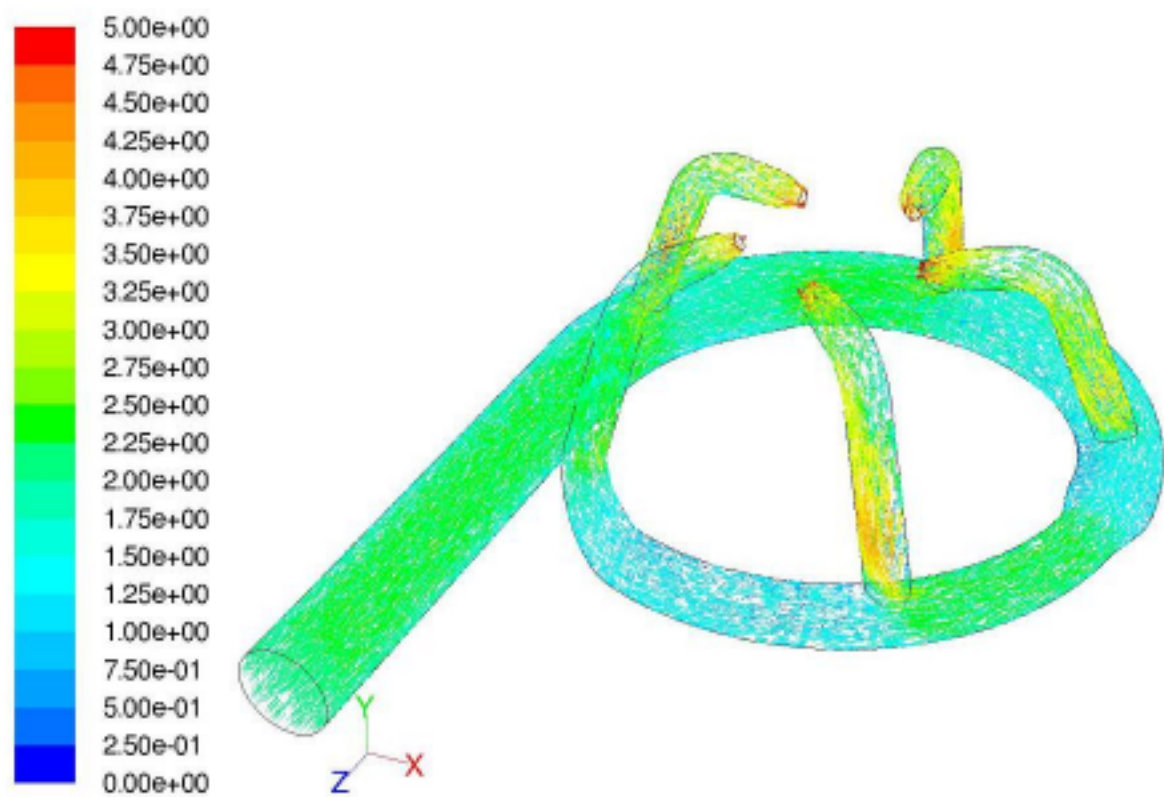
Obr. 33 – Vektory rychlosti-Varianta 1A



Obr. 34 – Vektory rychlosti-Varianta 1B



Obr. 35 – Vektory rychlosti-Varianta 2



Obr. 36 – Vektory rychlosti-Varianta 2A