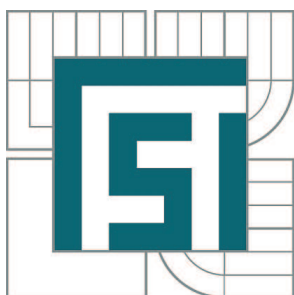


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

HYDRAULICKÝ NÁVRH DIFUZORU ČERPADLA PRO DVA PROVOZNÍ BODY.

THE DESIGN OF HYDRAULIC DIFFUSER FOR THE PUMP FOR TWO OPERATIONAL POINTS.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LENKA DOBŠÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MILOSLAV HALUZA, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lenka Dobšáková

který/která studuje v **magisterském navazujícím 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:

Hydraulický návrh difuzoru čerpadla pro dva provozní body.

v anglickém jazyce:

The design of hydraulic diffuser for the pump for two operational points.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Klasický návrh difuzoru čerpadla je proveden pro návrhový bod, kde se očekává maximální účinnost. Když se však čerpadlo provozuje v jiném bodě, než optimálním, účinnost klesá a provoz je méně hospodárný.

Diplomová práce by měla určit takový návrh difuzoru, který by byl navržen pro dva provozní body a posoudit jeho chování vůči difuzoru klasickému.

Cíle diplomové práce:

Provedení návrhu neklasického difuzoru pro dva provozní body, provést výpočty proudění v tomto difuzoru a posoudit jeho chování a vliv na charakteristiku čerpadla.

Seznam odborné literatury:

- 1) Brada, K. Bláha, J.: Příručka čerpací techniky, ČVUT Praha, 1997.
- 2) ČSN EN ISO 9906 Hydrodynamická čerpadla - Přejímací zkoušky hydraulických výkonových parametrů.
- 3) Melichar, J., Bláha, J. : Problematika soudobé čerpací techniky, ČVUT Praha, 2007.
- 4) Neumann, B.:The interaction between geometry and performance of a centrifugal pump, ISBN 0-85298-755-2, Page Bros. Ltd.m Norwich

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 9.11.2011

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Čerpadlo je navrhováno pro optimální bod provozu, ve kterém nejčastěji pracuje. Pokud stroj pracuje v oblastech průtoků mimo návrhový bod, dojde ke snížení jeho účinnosti, příp. k pulzacím. Aby mohlo být čerpadlo používáno ve velkém rozsahu průtoků a zároveň si udržovalo co nejvyšší účinnost bez nechtěných pulzací, může se provést kompromisní řešení pomocí rozvaděče s dvojitým tvarováním kanálů.

ABSTRACT

The pump is suggested for optimum operation point wherein usually works. If the machine works in the areas of flows except for design point, it will cause decrease in its efficiency or genesis of pulsation. The compromise solution is possible to use the pump in a large range of flows together with high efficiency. The solution is diffuser with double curvature of vanes.

KLÍČOVÁ SLOVA

Čerpadlo, difuzor, rozvaděč, charakteristika čerpadla, pracovní bod, CFD (Computational Fluid Dynamic).

KEY WORDS

Pump, diffuser, distributor, characteristic of pump, operating point, CFD (Computational Fluid Dynamic).

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOBŠÁKOVÁ, L. *Hydraulický návrh difuzoru čerpadla pro dva provozní body*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Hydraulický návrh difuzoru čerpadla pro dva provozní body* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu v této práci.

Datum: 25. 5. 2012

.....
Lenka Dobšáková

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Miloslavu Haluzovi, CSc. za odborné vedení mé práce, podmětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce. Ráda bych poděkovala také panu doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, PhD. za rady při tvorbě výpočetní sítě a při práci v CFD Fluent.

Obsah

1	Úvod	15
2	Funkce radiálně axiálního čerpadla	17
2.1	Měrná energie čerpadla	18
3	Výpočet difuzoru (rozvaděče) za oběžným kolem	19
3.1	Základní parametry difuzoru	19
3.2	Návrh difuzoru pomocí rychlostí c_u a c_m	21
3.2.1	Šířka difuzoru je konstantní	22
3.2.2	Šířka difuzoru se lineárně mění	23
3.2.3	Šířka difuzoru se nelineárně mění	25
3.2.4	Newtonova metoda pro řešení nelineárních rovnic	27
3.3	Návrh difuzoru pomocí konformních souřadnic	29
3.3.1	Konformní zobrazení obecně	29
3.3.2	Konformní zobrazení při návrhu difuzoru	33
3.3.3	Šířka difuzoru se nemění	33
3.3.4	Šířka difuzoru se mění lineárně nebo kvadraticky	35
3.4	Kontrola návrhu difuzoru	35
3.5	Návrh kanálu difuzoru	36
3.6	Návrh difuzoru pro dva pracovní body - teorie	38
4	Návrh difuzoru pro dva pracovní body v praxi	40
4.1	Návrh proudnice difuzoru pro vysoký průtok	40
4.2	Návrh proudnice difuzoru pro nízký průtok	45
4.3	Návrh lopatky difuzoru	47
4.4	Návrh difuzoru pro dva pracovní body	49
5	Tvorba CFD modelu	50
5.1	Tvorba výpočetní sítě	50
5.2	Vstupní rychlost na difuzor	53
5.2.1	Určení okrajových podmínek - teorie	53
5.2.2	Určení okrajových podmínek – praxe	55
5.3	Výpočet proudění v programu Ansys Fluent	56
5.3.1	Nastavení a okrajové podmínky	56

5.4	Vyhodnocení počítačového modelování.....	59
5.5	Proudění uvnitř difuzoru pro dva pracovní body	63
5.5.1	Při průtoku $Q = 315$ l/s.....	63
5.5.2	Při průtoku $Q = 415$ l/s.....	64
5.5.3	Při průtoku $Q = 515$ l/s.....	66
5.5.4	Při průtoku $Q = 615$ l/s.....	67
5.5.5	Při průtoku $Q = 715$ l/s.....	69
6	Měření difuzoru čerpadla pro dva provozní body.....	71
7	Závěr	73
	Seznam použité literatury	75
	Seznam použitých symbolů a značek.....	77
	Seznam obrázků a tabulek	79
	Seznam příloh	81

1 Úvod

Čerpadlo je nejpoužívanějším strojem na světě. Nelze vyčíslit, kolik se jich na celém světě používá. Ale s jistotou se dá říci, že je to velmi vysoké číslo. Spousta čerpadel se používá denně a velmi často se nejedná zrovna o malé stroje s malým výkonem.

Pokud bychom se na problém velkého množství čerpadel podívali z ekonomické stránky, zjistili bychom, že finance, které se do čerpadel za celou dobu jejich životnosti investují, jsou horentní. Nejde totiž jen o peníze vložené do pořízení čerpadla, ale i o útraty za údržbu, opravy a především za energii potřebnou pro jejich provoz.

Cena energie, kterou čerpadla spotřebují za celou dobu jejich provozu, většinou mnohonásobně převyšuje cenu samotného čerpadla dohromady s cenou jeho údržby a oprav. Proto je obrovská snaha snížit množství energie, kterou čerpadlo spotřebovává. Tato snaha bývá tak velká, že jen do ní se vkládá velké množství peněz. Pořád je to ale málo proti tomu, kolik financí se vynaloží za to, aby čerpadla čerpala.

Čerpadla jsou navrhována pro jeden pracovní bod. V tomto pracovním bodě, nebo v jeho blízkosti, bývá čerpadlo nejvíce používáno. Pokud bychom vzali čerpadlo, které čerpá celý den za stejných podmínek (v jednom pracovním bodě), bude zajisté existovat požadavek, aby čerpadlo mělo právě v tomto pracovním bodě co nejmenší spotřebu a tedy i co největší účinnost. Pokud bychom toto čerpadlo provozovali v jiném než v optimálním bodě, klesla by účinnost a provoz by byl méně hospodárný. Mohly by se také objevit komplikace způsobené zvětšením pulzací stroje.

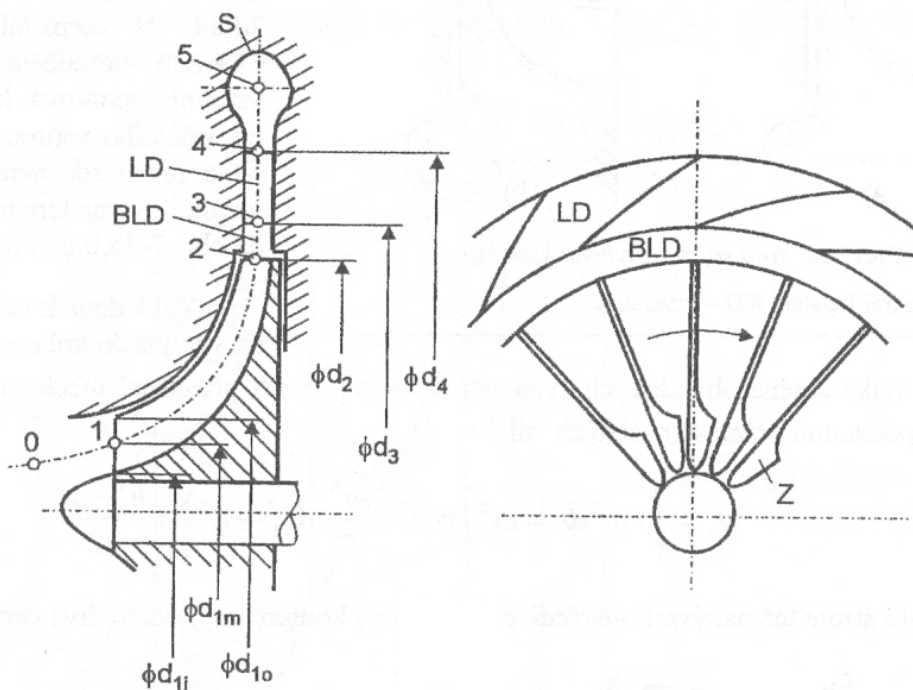
Pokud jsme pořídili čerpadlo, které bylo akorát pro nás, a po čase se výrazně změnila požadavky, tedy změnil se pracovní bod, je potřeba buď čerpadlo vyměnit, anebo upravit. Podobný problém musela řešit firma “ISH a MSA čerpadla“ u čerpadla ropné přečerpávací stanice. Toto čerpadlo je potřeba střídavě provozovat ve dvou provozních bodech a zároveň udržovat co nejvyšší účinnost.

Aby mohlo být čerpadlo používáno ve velkém rozsahu průtoků a zároveň si udržovalo co nejvyšší účinnost bez nechtěných pulzací, může se provést kompromisní řešení pomocí rozvaděče navrženého pro dva provozní body.

2 Funkce radiálně axiálního čerpadla

„U radiálně-axiálních čerpadel vstupuje pracovní látka do oběžného kola axiálně a vystupuje z kola v radiálním směru (při sledování v osovému řezu strojem). Na výstupu z oběžného kola bývá vedle meridiální (radiální) složky c_{m2} rychlosti také velmi podstatná a někdy i značně větší unášivá (obvodová) složka rychlosti c_{u2} . Unášivá složka rychlosti na vstupu čerpadla buď vůbec není, anebo je velmi malá.

Tekutina vystupující z oběžného kola čerpadla vstupuje do difuzoru, v němž se přeměňuje část kinetické energie na tlakovou energii. Difuzor může být lopatkový, bezlopatkový nebo za výstupem z kola bezlopatkový a dále lopatkový, jak je zobrazeno na obr. 2.1



Obr. 2.1 Radiálně axiální čerpadlo; S spirála, LD lopatkový difuzor, BLD bezlopatkový difuzor [2]

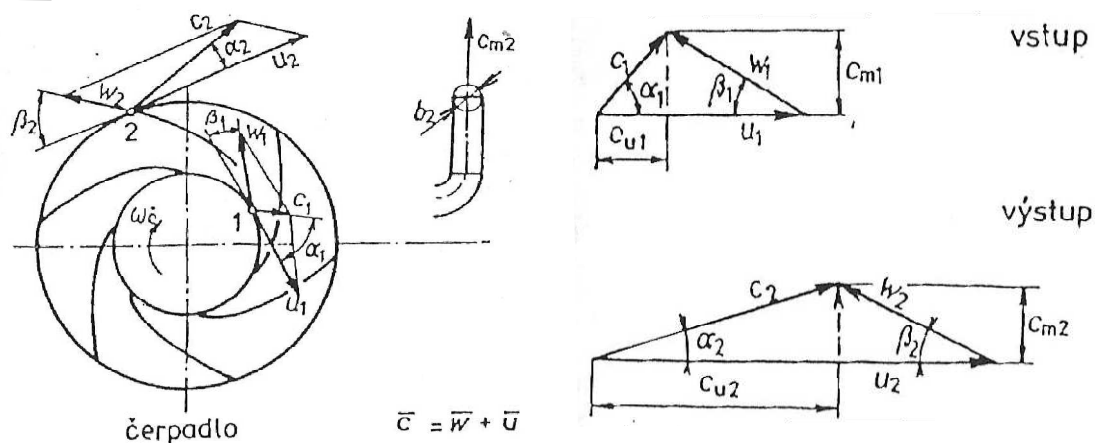
Čerpadla mohou být jednostupňová nebo vícestupňová. V prvním případě za difuzorem následuje spirální skříň, v níž pokračuje přeměna kinetické energie na energii tlakovou. Tekutina se sbírá z obvodu difuzoru, převádí do tangenciálního směru a odvádí ze stroje výstupním hrdlem. V druhém případě se tekutina převádí z výstupu difuzoru převáděcím kanálem ke vstupu do oběžného kola následujícího stupně. Za posledním stupněm rovněž následuje výstupní spirální skříň.“ [2]

2.1 Měrná energie čerpadla

Teoretická měrná energie kapaliny Y , (získaná v čerpadle) lze vyjádřit pomocí vztahu, nazývaného jako **Eulerova čerpadlová rovnice**. Rovnice udává teoretickou měrnou energii kapaliny pomocí unášivých složek absolutní rychlosti c_u a unášivé rychlosti u , a je definována vztahem [4]:

$$Y = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}$$

kde: index 1 značí vstup kapaliny do prostoru oběžného kola čerpadla a index 2 značí výstup, viz obr. 2.2.



Obr. 2.2 Kinematické poměry v oběžném kole čerpadla [4]

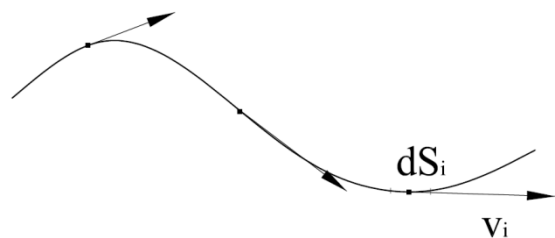
Označení rychlostí: c ... celková rychlost
 w ... relativní rychlost (také označovaná v)
 u ... unášivá rychlost
 c_u ... unášivá složka celkové rychlosti
 c_m ... meridiální složka unášivé rychlosti

3 Výpočet difuzoru (rozvaděče) za oběžným kolem

Jak bylo zmíněno již v předchozí kapitole, funkcí difuzoru je přeměna kinetické energie kapaliny proudící z oběžného kola čerpadla na energii potenciální. Pod touto přeměnou stojí snížení rychlosti kapaliny na výstupu a s tím související zvýšení tlaku.

Požadavkem, který je na difuzor kladen, je minimalizace ztrát. Difuzor musí od čerpadla převzít kapalinu, zpomalit ji a odvést pryč do spirály, aniž by způsobil její rozvíření. Aby byly ztráty co nejmenší, nesmí v difuzoru docházet k žádným rázům ani ke kavitaci.

Kapalina vycházející z čerpadla proudí pod určitým úhlem (viz obr. 2.2). Abychom minimalizovali ztráty v difuzoru, nesmí kapalina po vstupu do difuzoru výrazně změnit směr. Toto dodržíme, pokud budou lopatky kopírovat tvar proudnice kapaliny vytékající z čerpadla.



Obr. 3.1 Proudnice

Proudnice je myšlená čára, ke které jsou směry rychlosti tečné. Proudnice je křivka, která představuje pohyb částice prostorem. Pokud bychom uvažovali pouze dvourozměrný prostor, můžeme říci, že proudnice se nemohou protnout (chovají se jako pevná stěna) a proto průtok mezi dvěma proudnicemi je konstantní.

3.1 Základní parametry difuzoru

Dříve, než začneme cokoli počítat, ujasněme si, co znamenají jednotlivé parametry difuzoru a čerpadla. Na obr. 3.2 je zobrazen lineárně se rozšiřující difuzor a výstupní část čerpadla.

R_i ... poloměr v bodě i

D_i ... průměr v bodě i

b_i ... šířka v bodě i

Význam indexů: 2 ... výstup z čerpadla, 3 ... vstup do difuzoru, 4 výstup z difuzoru

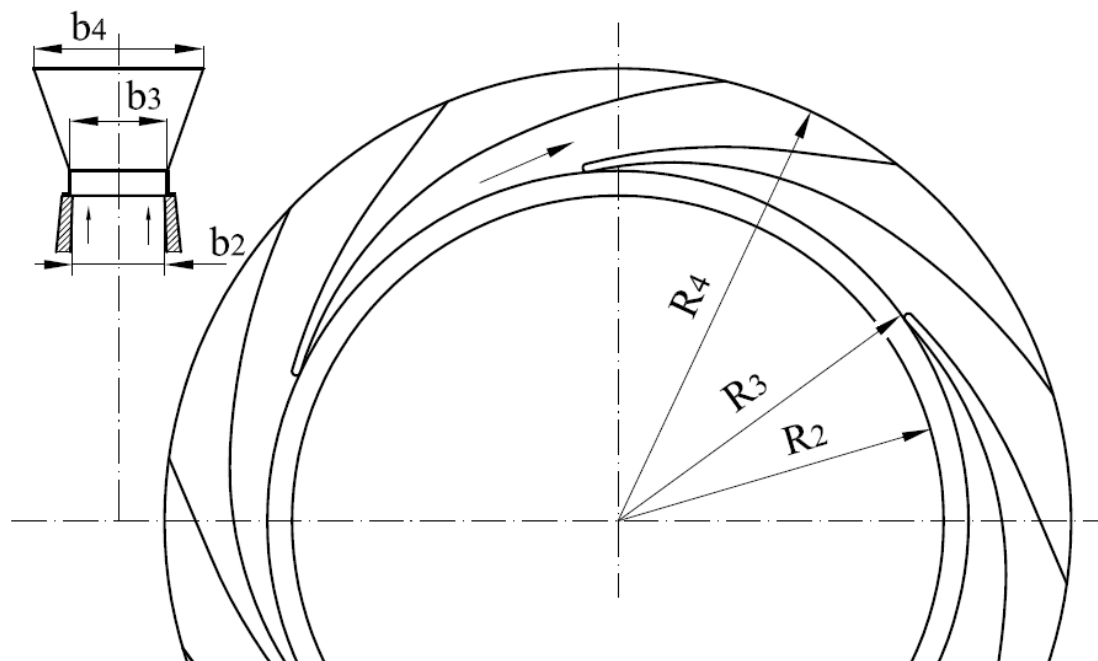
Při výpočtu rozvaděče se snažíme dodržovat následující parametry:

$$b_3 = b_2 + (1 \div 2)mm$$

$$D_3 = D_2 \cdot (1,02 \div 1,04)$$

$$D_4 \doteq (1,3 \div 1,4) \cdot D_2$$

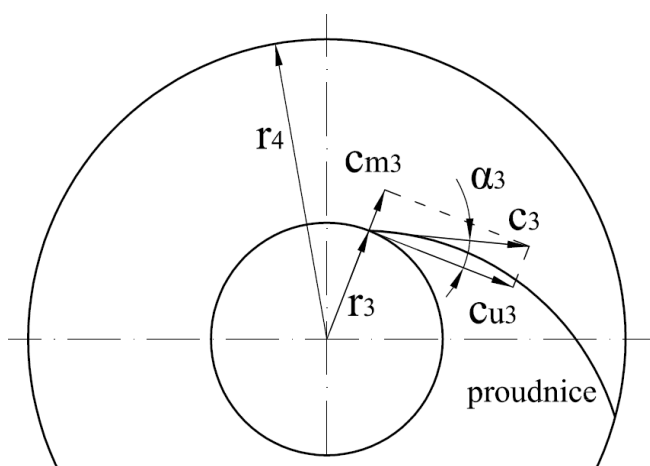
Difuzor nesmí mít příliš velké rozšíření, aby nedocházelo k odtrhávání proudu.



Obr. 3.2 Schéma difuzoru

Úhel lopatky difuzoru se vypočte podílem meridiální a unášivé složky celkové rychlosti. Pomocí obr. 3.3 můžeme napsat:

$$\operatorname{tg}(\alpha_3) = \frac{c_{m3}}{c_{u3}}$$



Obr. 3.3 Rychlosti na vstupu do difuzoru

Meridiální složka celkové rychlosti na vstupu do difuzoru udává průtok plochou a můžeme ji zapsat:

$$c_{m3} = \frac{Q}{2\pi r_3 b_2} ,$$

kde Q je průtok.

Unášivá složka celkové rychlosti na vstupu do difuzoru:

$$c_{u3} = \left(\frac{gH}{u_2 \eta_h} \right) \cdot \frac{r_2}{r_3} ,$$

kde g je gravitační zrychlení, H dopravní výška, u_2 unášivá rychlost na výstupu z čerpadla.

Jak je vidět na obrázku 3.3, rychlost c_u je tečná ke kružnici zobrazující poloměr a rychlost c_m je ve směru normály. Unášivá rychlost u má stejný směr jako její složka c_u .

$$u_2 = 2\pi n ,$$

kde n jsou otáčky čerpadla v s^{-1} .

3.2 Návrh difuzoru pomocí rychlostí c_u a c_m

Pro návrh geometrie difuzoru můžeme použít dva různé způsoby. První z nich využívá rychlosti c_u a c_m , a vlastnosti proudnice, kterou pomocí výpočtů získáme a její tvar použijeme jako tvar lopatky difuzoru. Druhý způsob návrhu lopatky je za pomoci konformních souřadnic.

Pro návrh difuzoru pomocí rychlostí c_u a c_m musíme nejdříve tyto rychlosti určit a vhodně upravit. Napišme si základní rovnice (3.1) a (3.2), ze kterých budeme vycházet.

Eulerova čerpadlová rovnice:

$$\frac{gH}{\eta_h} = u_3 c_{u3} \quad (3.1)$$

kde η_h je hydraulická účinnost.

Rovnice pro určení meridiální složky celkové rychlosti:

$$c_{m3} = \frac{Q}{2\pi r_3 b_3} \quad (3.2)$$

Rovnice upravíme do vhodnějšího jednoduššího tvaru zavedením konstant K_1 a K_2 . (3.3)

$$\frac{gH}{\eta_h} = u_3 c_{u3} \quad \Rightarrow \quad c_{u3} = \frac{gH}{\eta_h u_3} = \frac{gH}{\eta_h 2\pi n r_3} = \frac{K_1}{r_3}$$

$$c_{m3} = \frac{Q}{2\pi r_3 b_3} = \frac{K_2}{r_3 b_3}$$

Dostaneme tedy rovnice, které vyjadřují změnu rychlosti c_u či c_m v závislosti na poloměru r , příp. šířky difuzoru b .

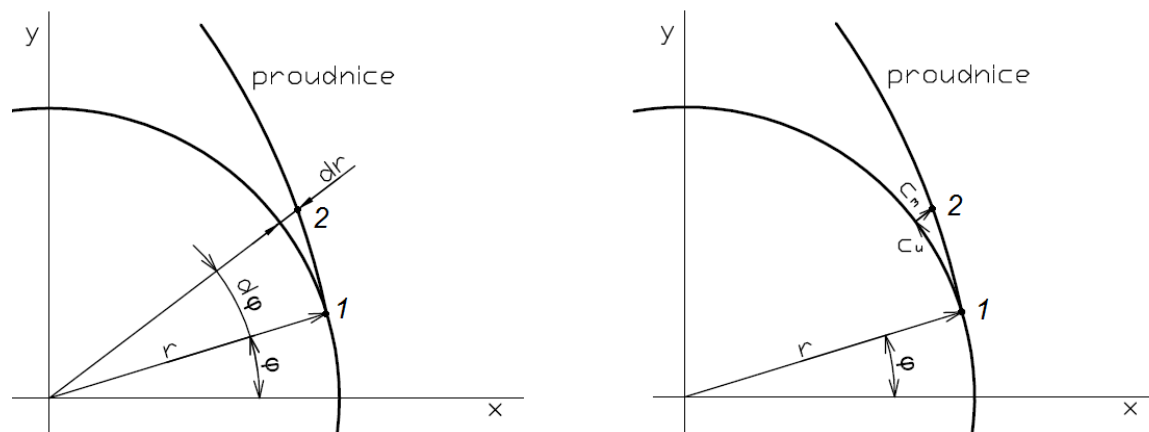
$$c_u = \frac{K_1}{r}, \quad \text{kde } K_1 = \frac{gH}{\eta_h 2\pi n}$$

$$c_m = \frac{K_2}{rb}, \quad \text{kde } K_2 = \frac{Q}{2\pi} \quad (3.4)$$

Představme si částici kapaliny proudící v difuzoru. Jak zobrazuje obrázek 3.4, za časový okamžik dt se částice posune z místa 1 do místa 2. Rychlostí c_u , tedy unášivou složkou celkové rychlosti, uběhne částice za časový okamžik dt dráhu $r \cdot d\varphi$. Rychlostí c_m , tedy meridiální složkou celkové rychlosti, uběhne částice za časový okamžik dt dráhu dr . Můžeme psát následující rovnice:

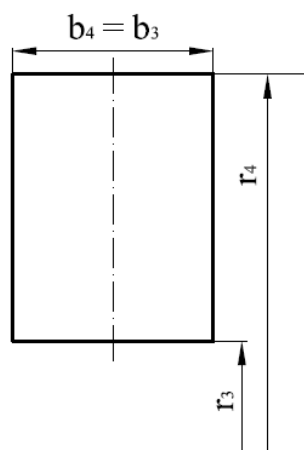
$$r d\varphi = c_u dt \quad (3.5)$$

$$dr = c_m dt \quad (3.6)$$



Obr. 3.4 Zobrazení pohybu částice po proudnici

3.2.1 Šířka difuzoru je konstantní



Obr. 3.5 Tvar difuzoru s konstantní šířkou

Jako první příklad tohoto typu řešení použijeme zjednodušený případ, a to takový, že šířku difuzoru necháme konstantní. Tedy $b = \text{konstant}$. Použijeme již upravené Eulerovy čerpadlové rovnice (3.3) a (3.4):

$$c_u = \frac{K_1}{r} \quad , \text{ kde } K_1 = \frac{gH}{\eta_h 2\pi n}$$

$$c_m = \frac{K_3}{r} \quad , \text{ kde } K_3 = \frac{Q}{2\pi b_3} = \text{konst.} \quad (3.7)$$

V předchozí rovnici (3.7) jsme zavedli novou konstantu K_3 . Tato konstanta je vlastně konstanta K_2 , jen doplněná o rozměr b_3 , který se v tomto případě nemění.

Zapíšeme si rovnice (3.5) a (3.6) a dosadíme za c_u a c_m složku rychlosti hodnoty z rovnic (3.3) a (3.7).

$$r \cdot d\varphi = c_u \cdot dt = \frac{K_1}{r} dt$$

$$dr = c_m \cdot dt = \frac{K_3}{r} dt$$

Rovnice navzájem podělíme a vhodně upravíme tak, abychom nakonec získali rovnici tvaru lopatky difuzoru $r = r(\varphi)$.

$$\frac{dr}{r \cdot d\varphi} = \frac{\frac{K_3}{r} dt}{\frac{K_1}{r} dt} = \frac{K_3}{K_1}$$

$$dr = \frac{K_3}{K_1} r \cdot d\varphi$$

Provedeme integraci:

$$\frac{dr}{r} = \frac{K_3}{K_1} d\varphi$$

$$\ln r = \frac{K_3}{K_1} \varphi + C \quad (3.8)$$

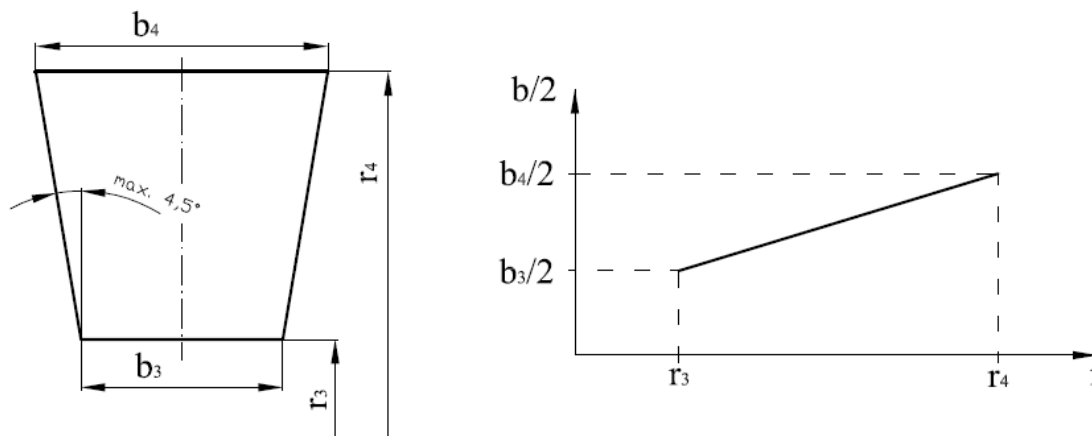
A protože platí, že $e^{a+b} = e^a \cdot e^b$, pak

$$r = e^{\frac{K_3}{K_1} \varphi + C} = e^{\frac{K_3}{K_1} \varphi} \cdot e^C = C \cdot e^{\frac{K_3}{K_1} \varphi}$$

Získali jsme rovnici logaritmické spirály, tedy rovnici popisující tvar lopatky difuzoru.

Integrační konstantu C získáme zavedením okrajové podmínky, např.: pro $\varphi = 0^\circ$ je $r = r_3$. Tuto podmínku dosadíme do rovnice (3.8). Jedinou neznámou pak bude v této rovnici právě konstanta C.

3.2.2 Šířka difuzoru se lineárně mění



Obr. 3.6 Tvar difuzoru s lineárně se měnící šířkou (úhel rozšíření difuzoru nesmí překročit 9° , jinak by docházelo k odtrhávání proudu!)

Přejdeme k řešení lineárně se rozšiřujícího difuzoru, tedy když šířka difuzoru b není konstantní, ale s poloměrem r se mění podle rovnice přímky:

$$b = kr + q \quad (3.9)$$

Dvě vzniklé konstanty k a q vypočteme zavedením počátečních podmínek a jejich dosazením zpět do rovnice přímky (3.9). Získáme tím dvě rovnice o dvou neznámých.

Počáteční podmínky: $r = r_2$ $b = b_2$

$$r = r_4 \quad b = b_4$$

Předpokládejme, že konstanty jsme vypočetli. Nyní dosadíme rovnici přímky (3.9) do upravené Eulerovy rovnice (3.4):

$$c_m = \frac{K_2}{r(kr + q)} = \frac{K_2}{kr^2 + qr} \quad (3.10)$$

Vrátíme se k rovnicím (3.5) a (3.6), do kterých dosadíme složky rychlostí c_u a c_m uvedených v (3.3) a (3.10). Postupujeme stejně jako v předchozím případě.

$$rd\varphi = c_u dt = \frac{K_1}{r} dt$$

$$dr = c_m dt = \frac{K_2}{rb} dt = \frac{K_2}{kr^2 + qr} dt$$

Rovnice podělíme a vhodně upravíme:

$$\frac{dr}{rd\varphi} = \frac{K_2 dt}{kr^2 + qr} \frac{1}{\frac{K_1}{r} dt} = \frac{K_2}{K_1(kr + q)} = \frac{K_2}{K_1} \frac{1}{kr + q}$$

$$dr = \frac{K_2}{K_1} \frac{rd\varphi}{kr + q} \Rightarrow \frac{kr + q}{r} dr = d\varphi \frac{K_2}{K_1}$$

$$\frac{kr + q}{r} dr = \frac{K_2}{K_1} d\varphi$$

$$k \cdot dr + \frac{q}{r} dr = \frac{K_2}{K_1} d\varphi$$

Provedeme integraci:

$$kr + q \cdot \ln r = \frac{K_2}{K_1} \varphi + C$$

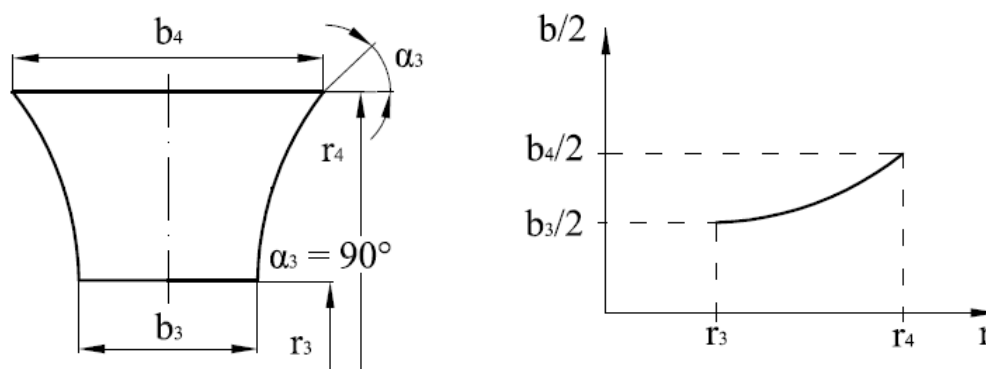
$$r + \frac{q}{k} \ln r = \frac{1}{k} \frac{K_2}{K_1} \varphi + \frac{C}{k}$$

$$r + \frac{q}{k} \ln r = \frac{1}{k} \frac{K_2}{K_1} \varphi + C_o$$

Získali jsme rovnici tvaru lopatky difuzoru. Jde o nelineární rovnici. Konstanty k a q známe z předchozích výpočtů. Integrační konstantu C_o určíme stejně jako v případě $b = \text{konst.}$ pomocí okrajové podmínky, např.: pro $\varphi = 0^\circ$ je $r = r_3$.

$$C_o = r_3 + \frac{q}{k} \ln r_3$$

3.2.3 Šířka difuzoru se nelineárně mění



Obr. 3.7 Tvar difuzoru s nelineárně se měnící šířkou

Návrh nelineárně se rozšiřujícího difuzoru je obdobný návrhům předchozích dvou, jen o něco složitější. Při návrhu využíváme Newtonovu metodu pro řešení nelineárních rovnic popsanou v následující kapitole 3.2.4.

Nejdříve určíme, jak se bude šířka difuzoru měnit v závislosti na poloměru. Napíšeme tedy rovnici polynomu $b = b(r)$:

$$b = a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1 \quad (3.11)$$

Stejně jako v případě lineárně se rozšiřujícího difuzoru i zde vznikly konstanty, které neznáme. Rozdíl je pouze v tom, že konstanty nejsou jen dvě, ale jsou rovnou čtyři. Vzniklé konstanty a_1 , b_1 , c_1 a d_1 vypočteme zavedením počátečních podmínek a jejich dosazením do rovnice $b = b(r)$. Získáme tím čtyři rovnice o čtyřech neznámých.

Počáteční podmínky: pro $r = r_3$ je	$b = b_3$
pro $r = r_4$ je	$b = b_4$
pro $r = r_3$ je	$\frac{db}{dr} = 0$
pro $r = r_4$ je	$\frac{db}{dr} = \operatorname{tg}(\alpha)$

Jak jsme přišli na poslední dvě podmínky je zakresleno v obrázku 3.7. V místě r_3 je úhel $\alpha = 90^\circ$, neexistuje tu změna šířky difuzoru b , tedy $db = 0$. Protože je tangens úhlu α definován jako protilehlá strana trojúhelníku $db/2$ ku přilehlé dr , je tangens v našem případě roven nule. Stejná myšlenka je použita i k získání počáteční podmínky pro případ $r = r_4$.

Předpokládejme, že konstanty jsme vypočetli. Nyní dosadíme rovnici polynomu (3.11) do upravené Eulerovy rovnice (4):

$$c_m = \frac{K_2}{rb} = \frac{K_2}{r(a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1)} \quad (3.12)$$

Vrátíme se k rovnicím (3.5) a (3.6), do kterých dosadíme složky rychlostí c_u a c_m uvedených v (3.3) a (3.12). Postupujeme stejně jako v předchozím případě.

$$rd\varphi = c_u dt = \frac{K_1}{r} dt$$

$$dr = c_m dt = \frac{K_2}{rb} dt = \frac{K_2}{r(a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1)} dt$$

Rovnice podělíme a vhodně upravíme:

$$\frac{dr}{r \cdot d\varphi} = \frac{K_2 \cdot dt}{r(a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1)} \frac{r}{K_1 dt} = \frac{K_2}{K_1} \frac{1}{a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1}$$

$$dr = \frac{K_2}{K_1} \frac{1}{a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1} r \cdot d\varphi$$

$$\frac{a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1}{r} dr = \frac{K_2}{K_1} d\varphi$$

$$(a_1 r^2 + b_1 r + c_1 + \frac{d_1}{r}) dr = \frac{K_2}{K_1} d\varphi$$

Provedeme integraci:

$$a_1 \frac{r^3}{3} + b_1 \frac{r^2}{2} + c_1 r + d_1 \cdot \ln(r) = \frac{K_2}{K_1} \varphi + C_0 \quad (3.13)$$

Získali jsme rovnici tvaru lopatky difuzoru. Jde o nelineární rovnici. Konstanty a_1 , b_1 , c_1 a d_1 známe z předchozích výpočtů. Integrační konstantu C_0 určíme pomocí okrajové podmínky, např.: pro $\varphi = 0^\circ$ je $r = r_3$.

$$C_0 = a_1 \frac{r_3^3}{3} + b_1 \frac{r_3^2}{2} + c_1 r_3 + d_1 \cdot \ln(r_3)$$

Abychom dopočítali hodnoty bodů křivky lopatky, kterou rovnice (3.13) popisuje, musíme použít Newtonovu metodu pro řešení nelineárních rovnic, tedy rovnici (3.15) (přesný postup výpočtu s použitím Newtonovy metody pro řešení nelineárních rovnic je popsán v kapitole 3.2.4). Musíme nejdříve určit funkce $f(r)$, z rovnice (3.13), a její derivaci $f'(r)$.

$$f(r) = a_1 \frac{r^3}{3} + b_1 \frac{r^2}{2} + c_1 r + d_1 \cdot \ln(r) - \frac{K_2}{K_1} \varphi - C_0$$

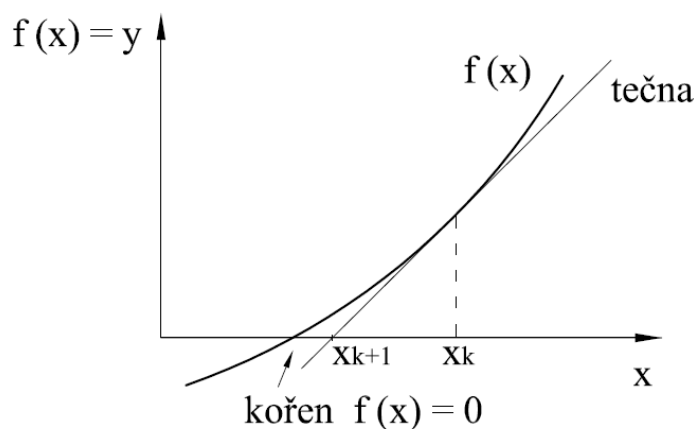
$$f'(r) = a_1 r^2 + b_1 r + c_1 + \frac{d_1}{r}$$

Nyní použijeme Newtonovu rovnici, abychom získali hodnoty bodů na křivce lopatky difuzoru:

$$r_{k+1} = r_k - \frac{f(r_k)}{f'(r_k)}$$

3.2.4 Newtonova metoda pro řešení nelineárních rovnic

Numerická Newtonova metoda se také označuje jako metoda tečen. Již z názvu vyplývá, že se bude využívat rovnice tečny. [1]



Obr. 3.8 Princip Newtonovy metody pro řešení nelineárních rovnic

Při výpočtu vycházíme z počáteční hodnoty x_0 a postupně počítáme x_1, x_2, \dots . Předpokládejme, že známe x_k , kde $k = 0, 1, 2, \dots, m$ a určujeme hodnoty x_{k+1} . Jak je vidět na obrázku 3.8, bodem $[x_k, f(x_k)]$ vedeme tečnu ke křivce $y = f(x)$. Průsečík této tečny s osou x označíme za x_{k+1} . [1]

Určení rovnice tečny: nejdříve si napíšeme rovnici tečny s použitím obrázku 1:

$$y = f'(x_k) \cdot x + q$$

$$f(x_k) = f'(x_k) \cdot x + q \quad (3.14)$$

Vznikla nám zde neznámá konstanta q . Zavedeme tedy počáteční podmínku: při $y = 0$ je $x = x_{k+1}$. Dosadíme do rovnice a vypočteme konstantu q :

$$q = y - f'(x_k) \cdot x$$

$$q = 0 - f'(x_k) \cdot x_{k+1}$$

$$q = -f'(x_k) \cdot x_{k+1}$$

Nyní vypočtenou konstantu q dosadíme do rovnice (3.14):

$$f(x_k) = f'(x_k) \cdot x_k + -f'(x_k) \cdot x_{k+1}$$

Rovnici upravíme a tím získáme rovnici tečny:

$$f(x_k) = f'(x_k) \cdot (x_k - x_{k+1})$$

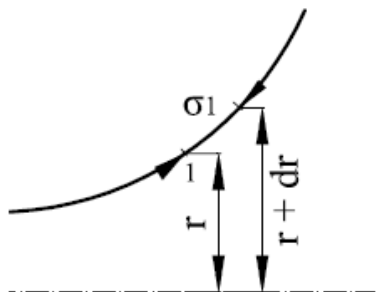
Protože x_k známe, jedinou neznámou v rovnici je x_{k+1} , kterou chceme získat.

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (3.15)$$

Podle této rovnice vypočteme hodnotu x_{k+1} a pro následující výpočet ji položíme rovnou x_k . Pro další výpočet tedy platí: $x_k = x_{k+1}$. Toto provádíme pro všechna $k = 1, 2, \dots, m$ ($k = 0$ jsme předpokládali, že známe).

3.3 Návrh difuzoru pomocí konformních souřadnic

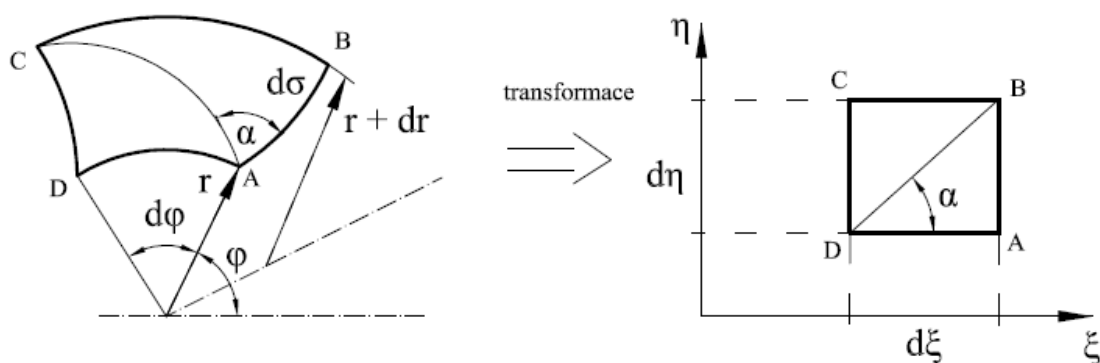
3.3.1 Konformní zobrazení obecně



Na obrázku 3.9 je zobrazena proudnice. Pokud si ji představíme rotačně symetrickou, vznikne proudová plocha. Je to imaginární plocha, po které protéká voda, ale neprotéká skrz ni.

Na obrázku 3.10 vidíme trojrozměrný výřez z proudové plochy. Je zde zobrazen převod výřezu z polárního na konformní souřadnicový systém.

Obr. 3.9 Proudnice



Obr. 3.10 Převod z polárních do konformních souřadnic

Pomocí obrázku 3.10 můžeme napsat:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{d\eta}{d\xi} = \frac{(r + dr)d\varphi}{d\sigma} = \frac{r \cdot d\varphi + dr \cdot d\varphi}{d\sigma} \doteq \frac{r \cdot d\varphi}{d\sigma} \quad (3.16)$$

Kde $r = r(\sigma)$. Člen $dr \cdot d\varphi$ v rovnici (3.16) neuvažujeme, protože je velmi malý, nepodstatný.

Abychom dodrželi podmínky pro konformní zobrazení, musí být η lineární funkcí φ . Tedy musí platit:

$$\frac{d\eta}{d\varphi} = k \quad (3.17)$$

V rovnici (3.16) je psáno, že platí:

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{r \cdot d\varphi}{d\sigma} \Rightarrow \frac{d\eta}{d\varphi} = \frac{r \cdot d\xi}{d\sigma}$$

Do upravené rovnice dosadíme z rovnice (3.17):

$$k = \frac{r \cdot d\xi}{d\sigma} \Rightarrow k \frac{d\sigma}{r} = d\xi$$

Převědeme do tvaru integrálu.

$$\xi = k \int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r} \quad (3.18)$$

Předpokládejme, že při výpočtu známe hodnoty v místě σ_0 i v místě σ_1 z předchozích výpočtů. Proto můžeme integrál rozepsat a zavést konstantu k_1 .

$$\xi = k \int_{\sigma_0}^{\sigma_1} \frac{d\sigma}{r} + k \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r} = k_1 + k \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r} \quad (3.19)$$

Zavedeme okrajové podmínky na vstupu lopatky, jak je na obrázku 3.11a.

$$\sigma = \sigma_1 \quad , \quad \xi = -\frac{h}{2}$$

a dosadíme je do rovnice (3.19):

$$-\frac{h}{2} = k_1 + k \int_{\sigma_1}^{\sigma_1} \frac{d\sigma}{r}$$

Získáme tak konstantu k_1 .

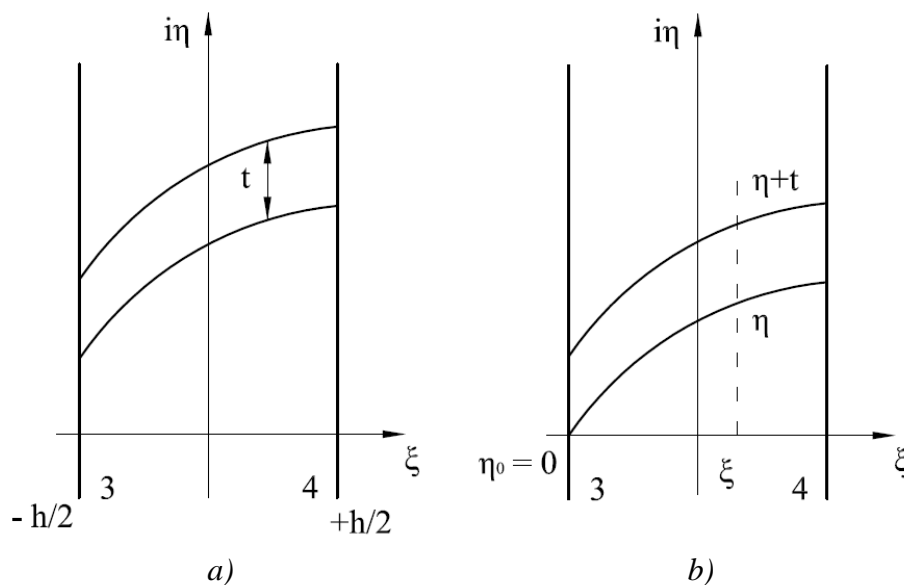
$$k_1 = -\frac{h}{2}$$

Vraťme se nyní k rovnici (3.17).

$$\frac{d\eta}{d\varphi} = k \quad \Rightarrow \quad d\eta = k \cdot d\varphi$$

Provedeme integraci a vznikne další konstanta k_2 , kterou získáme zavedením okrajových podmínek:

$$\eta = k \cdot \varphi + k_2 \quad (3.20)$$



Obr. 3.11 Konformní zobrazení, kde t je rozteč, a) obecný případ, b) případ pro $\eta = \eta_0 = 0$

Okrajové podmínky: pro $\eta = \eta_0$ platí $\varphi = 0$ (viz obr.3.11b) dosadíme do rovnice (3.20):

$$\eta_0 = k \cdot 0 + k_2$$

$$k_2 = \eta_0$$

Z této rovnosti plyne:

$$\eta_0 = 0 \Rightarrow k_2 = 0$$

Podle rovnice (3.20) pak platí:

$$\eta = k \cdot \varphi + \eta_0 \tag{3.21}$$

Uvažujme nyní více jak jednu lopatku (N na $360^\circ = 2\pi$ je z lopatek). Lopatky se pravidelně opakují a mají mezi sebou rozteč t , jak je zobrazeno na obrázku 3.11a. Upravíme tedy rovnici (3.21) do tvaru:

$$\eta + t = k \cdot \left(\varphi + \frac{2\pi}{z} \right) + \eta_0$$

Pokud opět zavedeme okrajové podmínky, kdy pro $\eta = \eta_0$ platí $\varphi = 0$, pak získáme konstantu k .

$$\eta_0 + t = k \cdot 0 + k \frac{2\pi}{z} + \eta_0$$

$$t = k \frac{2\pi}{z} \Rightarrow k = \frac{tz}{2\pi} \tag{3.22}$$

Protože jsme zjistili, co se skrývá pod všemi vzniklými konstantami, můžeme se vrátit k rovnici (3.19) a vhodně ji upravit tak, abychom získali základní rovnice pro rozměry η a ξ .

$$\xi = -\frac{h}{2} + k \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r} \quad (3.23)$$

$$\xi = -\frac{h}{2} + \frac{tz}{2\pi} \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r}$$

Jak je zobrazeno na obrázku, je hodnota ξ na výstupu lopatky rovna $h/2$. Můžeme tedy psát, že

$$\xi_2 = \frac{h}{2} \quad \Rightarrow \quad \frac{h}{2} = -\frac{h}{2} + k \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{r}$$

$$h = k \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{r} \quad (3.24)$$

Získáme opět konstantu k , kterou jsme řešili o pár řádků výš. Nově vypočtenou konstantu k dáme rovnu konstantě k v rovnici (3.22).

$$k = \frac{h}{a} \quad \Rightarrow \quad \frac{tz}{2\pi} = \frac{h}{a} \quad (3.25)$$

Vrátíme se k rovnici (3.23) a za konstantu k dosadíme verzi, kterou jsme právě vypočetli. Celou rovnici upravíme do vhodnějšího tvaru.

$$\xi = -\frac{h}{2} + \frac{h}{a} \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r}$$

$$\xi = h \left(\frac{1}{a} \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r} - \frac{1}{2} \right) \quad (3.26)$$

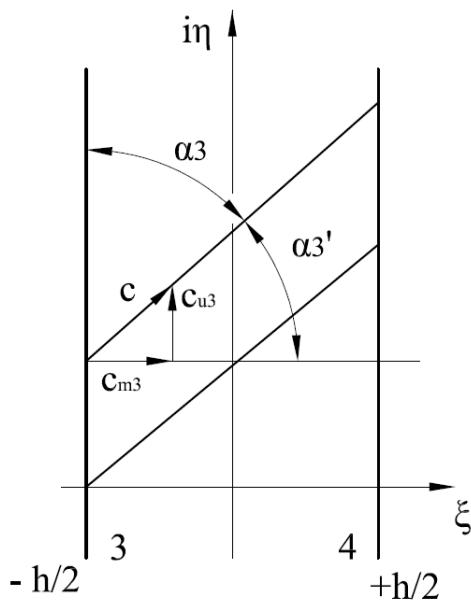
Pokud v rovnici (3.24) za konstantu k dosadíme h/a , získáme důležitou konstantu a , tedy konstantu lopatkové mříže.

$$a = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{r} \quad (3.27)$$

Jak je zobrazeno na obrázku, pro jednodušší výpočet můžeme dát $\eta_0 = 0$. Potom lze psát podle rovnice (3.21), že:

$$\eta = \frac{tz}{2\pi} \varphi = \frac{h}{a} \varphi \quad (3.28)$$

3.3.2 Konformní zobrazení při návrhu difuzoru



Pro využití konformního zobrazení pro výpočet tvaru lopatky difuzoru zavedeme myšlenku, že lineární tvar středové čáry profilu vede na logaritmickou spirálu (konstantní úhel). Vzorec pro úhel α_3 tedy není závislý na žádném proměnném parametru. K odvození následujících rovnic použijeme obrázek 3.12 a Eulerovy čerpadlové rovnice.

$$\eta = tg(\alpha'_3) \left(\xi + \frac{h}{2} \right) \quad (3.29)$$

Obr. 3.12 Konformní zobrazení profilu difuzoru

$$tg(\alpha'_3) = \frac{c_{m3}}{c_{u3}} = \left(\frac{gH}{2\pi n \cdot \eta_h} \right) \cdot \frac{r_2}{r_3} \cdot \frac{2\pi r_3 b_2}{Q} = \frac{gH b_2}{\eta_h n Q}$$

3.3.3 Šířka difuzoru se nemění

Jde o čistě radiální difuzor, tedy difuzor s obdélníkovým průřezem.

Konformní transformace je provedena za pomoci odvozených vzorců (3.26) a (3.28).

$$\xi = h \cdot \left(\frac{1}{a} \int_{\sigma_3}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r(\sigma)} - \frac{1}{2} \right)$$

$$\eta = \frac{h}{a} \cdot \varphi$$

Platí zde $d\sigma = dr$. Můžeme pak rovnici (3.26) přepsat do vhodnějšího tvaru:

$$\xi = h \left(\frac{1}{a} \int_{r_3}^r \frac{dr}{r} - \frac{1}{2} \right) \quad (3.30)$$

Připomeňme si konstantu lopatkové mříže (3.27), upravme integrační meze pro difuzor a integrujme:

$$a = \int_{r_3}^{r_4} \frac{dr}{r} = \ln(r_4) - \ln(r_3) = \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)$$

Upravenou konstantu lopatkové mříže dosadíme do rovnice (3.30).

$$\xi = h \left(\frac{1}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_3}\right) - \frac{1}{2} \right) \quad (3.31)$$

Konstantu lopatkové mříže dosadíme i do rovnice (3.25) a získáme tak

$$h = \frac{zt}{2\pi} \cdot a = \frac{zt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)$$

Potom platí podle rovnice (3.31):

$$\xi = \frac{zt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_3}\right) - \frac{h}{2} \quad (3.32)$$

Nyní si připomeňme základní rovnici (3.28), a to

$$\eta = \frac{h}{a} \varphi$$

Abychom získali tvar lopatky difuzoru, musíme převést souřadnice η a ξ na souřadnice polární r a φ a následně na kartézské souřadnice x a y , které se nejlépe zakreslují.

Rovnici (3.28) převedeme do takového tvaru, abychom dostali hodnotu úhlu φ (využijeme při tom znalost rovnice (3.29)):

$$\varphi = \frac{a}{h} \cdot \eta = \frac{2\pi}{zt} \cdot \eta = \frac{2\pi}{zt} \left(\operatorname{tg}(\alpha_3) \left(\xi + \frac{h}{2} \right) \right) \quad (3.33)$$

Při výpočtu volíme hodnoty ξ . Potom hodnotu poloměru r dostaneme úpravou rovnice (3.32):

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{zt} \left(\xi + \frac{h}{2} \right) &= \ln\left(\frac{r}{r_3}\right) \\ r &= r_3 e^{\frac{2\pi}{zt} \left(\xi + \frac{h}{2} \right)} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Abychom mohli tvar lopatky difuzoru snadno zakreslit, převedeme rozměry φ a r do kartézského souřadnicového systému x a y . K tomu využijeme základní znalosti goniometrických funkcí.

$$x = r \cdot \cos(\varphi) \quad , \quad y = r \cdot \sin(\varphi)$$

3.3.4 Šířka difuzoru se mění lineárně nebo kvadraticky

Při výpočtu lineárně či kvadraticky se rozšiřujícího difuzoru postupujeme obdobně jako v případě konstantní šířky. Výpočet je však o mnoho náročnější. Šířka difuzoru bude velmi důležitá a musí se uvažovat jako další proměnná veličina. Pro náročnost odvození zde nebudou tyto případy uvedeny.

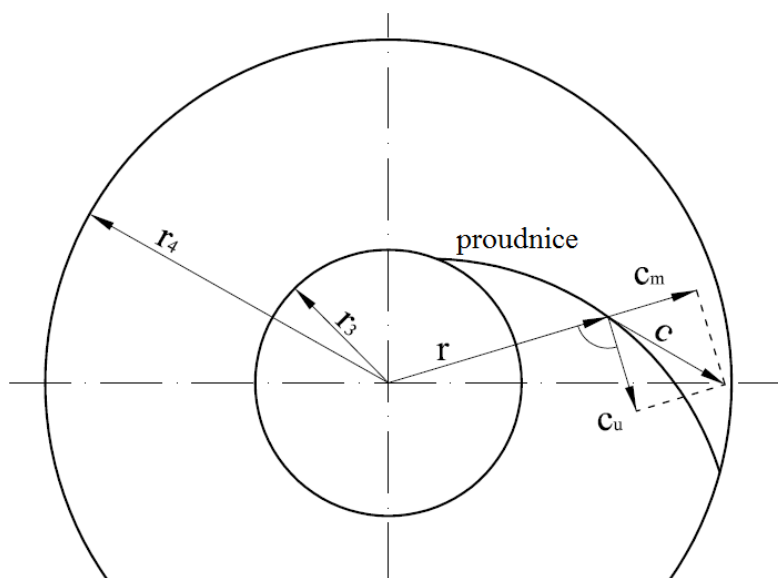
3.4 Kontrola návrhu difuzoru

Pokud jsme navrhli tvar lopatky difuzoru, jakýmkoli z výše uvedených způsobů, je potřeba zkontrolovat, jestli je výpočet správný. Velmi jednoduchá a rychlá kontrola je kontrola s použitím unášivé a meridiální složky celkové rychlosti kapaliny protékající kanálem. Tyto složky rychlosti vypočteme pro několik (např. 5) poloměrů, zakreslíme do obrázku pomocí vektorů a graficky určíme jejich vektorový součet, čímž určíme celkovou rychlost. Pokud je celková rychlost tečná ke křivce lopatky, pak je výpočet správný a můžeme přejít k dalším krokům návrhu difuzoru.

Připomeňme si vzorce pro určení unášivé c_u a meridiální c_m složky celkové rychlosti:

$$c_u = \frac{gh}{2\pi nr\eta_h}$$

$$c_m = \frac{Q}{2\pi r b}$$



Obr. 3.13 Zobrazení kontroly difuzoru: rychlost c musí být tečná na proudnici

3.5 Návrh kanálu difuzoru

Jestliže jsme získali tvar lopatky difuzoru, tedy tvar proudnice protékající kapalinou, je třeba ještě upravit kanál difuzoru tak, aby byla jeho funkce co nejlepší. Funkcí difuzoru je převod kinetické energie vycházející z oběžného kola čerpadla na energii tlakovou. Chceme tedy, aby na výstupu difuzoru byla menší rychlost, než na vstupu. Myšlenkou tohoto převodu je rovnice kontinuity.

$$v_1 = \frac{Q_1}{S_1} = \frac{Q_2}{S_2} = v_2 \quad (3.35)$$

Kde Q_i jsou průtoky a S_i jsou plochy, kterými kapalina protéká. Dolní index 1 značí vstupní hodnoty a dolní index 2 značí výstupní hodnoty.

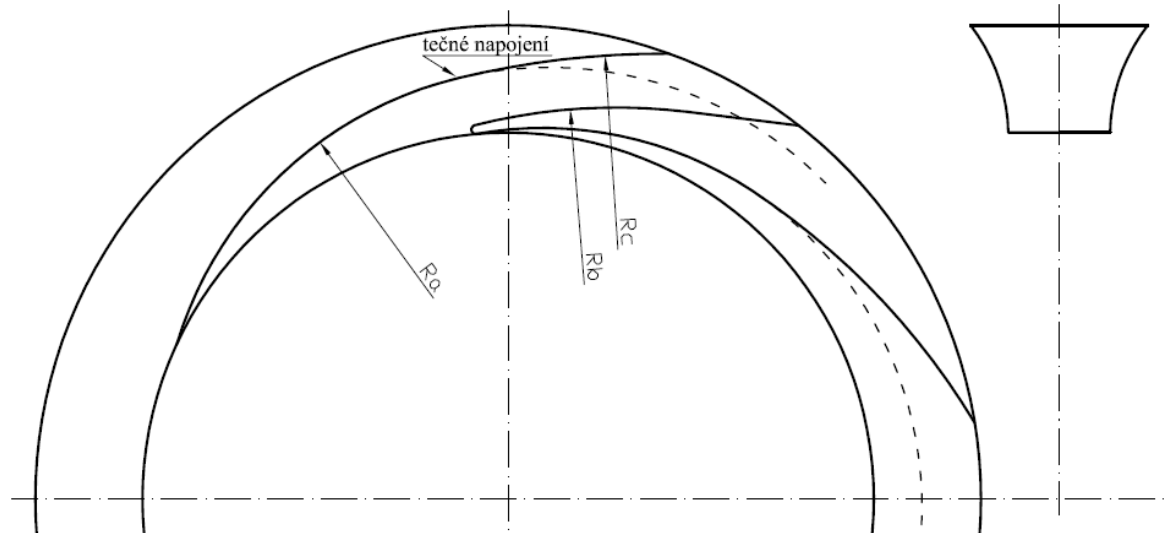
Rovnici (3.35) upravíme pro případ našeho navrhovaného difuzoru. Vstupem i výstupem kanálu protéká stejné množství vody, proto $Q_1 = Q_2 = Q$ (uvažujeme nestlačitelné proudění). Rychlosti v_1 a v_2 chceme, aby se změnily, musí se tedy měnit i velikost plochy, kterou kapalina protéká S_1 a S_2 .

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (3.36)$$

Dle rovnice kontinuity (3.36) platí, že čím větší bude průtočná plocha, tím menší bude rychlost. Protože, jak bylo řečeno výše, chceme, aby se snížila velikost rychlosti na výstupu difuzoru, je potřeba adekvátně zvětšit průtočnou plochu kanálu.

Na obrázku 3.14 je zobrazen difuzor s upraveným kanálem. Čárkovaná křivka zobrazuje proudnici, kterou jsme vypočítali v předchozích kapitolách. Když půjdeme po proudnici a dorazíme do místa, kde začíná nová proudnice, můžeme začít s úpravou difuzoru a nahrazením proudnice od tohoto místa jinou křivkou. Velmi důležitá věc je, aby napojení jiné křivky na proudnici bylo tečné, jak je vyznačeno na obrázku. Zbylou křivku proudnice i navazující křivku nahradíme obloukem (na obrázku 3.14 jsou to oblouky R_a a R_b).

Oblouk, který je na obrázku 3.14 zaznačen poloměrem R_c , je libovolný. Pokud je příliš dlouhý a zakulacený, můžeme ho zakončit tečně napojenou přímkou. Toto napojení se může provést již od místa, kde kanál skončil, tedy od místa 3 zaznačeného na obrázku 3.15.



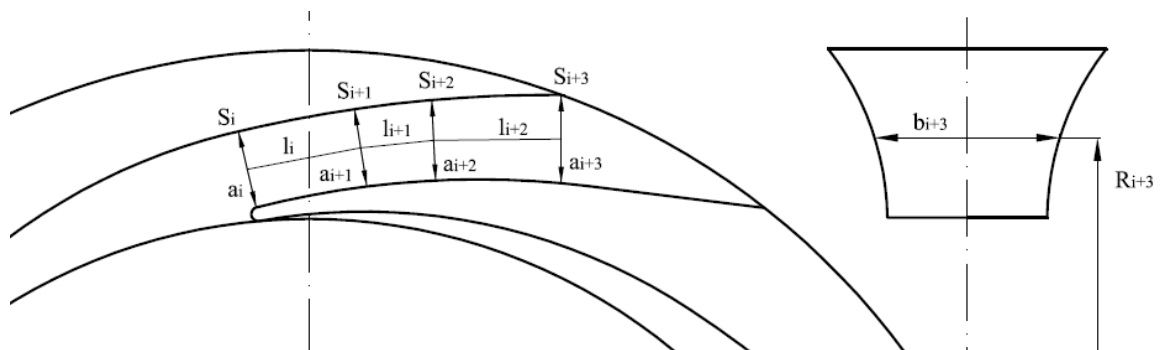
Obr. 3.14 Upravený kanál difuzoru

Při návrhu kanálu difuzoru si musíme dát velký pozor na to, abychom šířku kanálu neztvrdžovali moc rychle. Pokud by se tak stalo, došlo by k odtrhávání proudu, což je nežádoucí jev. Pokud budeme dodržovat následující konstrukční pravidlo, k nežádoucím jevům uvnitř difuzoru nedojde.

Pravidlo je popsáno následujícím vzorcem a zakresleno na 3.15.

$$\frac{\sqrt{S_{i+1}} - \sqrt{S_i}}{l_i} = \frac{1}{5} \div \frac{1}{8} ,$$

kde a_i je šířka kanálu a b_i je střední šířka difuzoru v místě i , l_i je vzdálenost mezi dvěma body (na obrázku jsou vzdálenosti velké jen kvůli popisu problému. Aby byl výpočet dostatečně přesný, musí být vzdálenosti mnohem kratší).

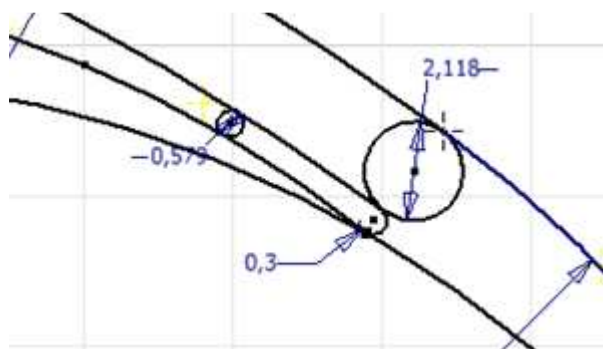


Obr. 3.15 Detail kanálu difuzoru a vyznačení jeho návrhu

Abychom měli pojistku proti chybě, která může být způsobena nepřesným výpočtem, zmenšíme při navrhování rozsah hodnot, ve kterých se můžeme pohybovat. Při konstrukci tedy budeme uvažovat vzorec:

$$\frac{\sqrt{S_{i+1}} - \sqrt{S_i}}{l_i} = \frac{1}{6} \div \frac{1}{7}$$

Pokud navrhujeme difuzor, který bude následně vyroben, musíme dát pozor na to, aby šířka lopatky nebyla příliš malá, jak je zobrazeno na obr. 3.16. Lopatku by pak buď vůbec nešlo vyrobit, anebo by to bylo příliš složité.



Obr. 3.16 Detail náběžné hrany lopatky s příliš malou šířkou

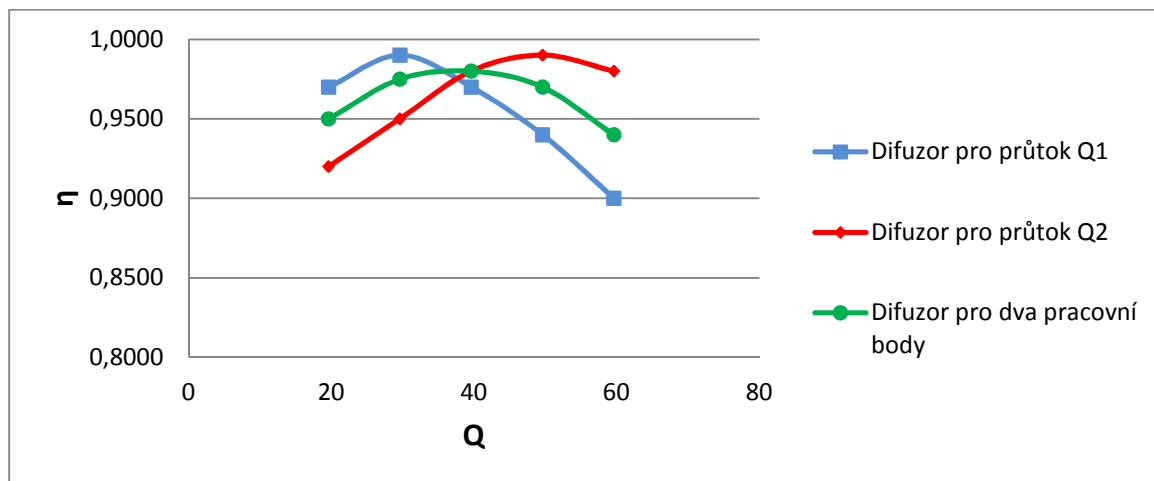
3.6 Návrh difuzoru pro dva pracovní body - teorie

Uvažujme dva návrhové body, pro které je třeba získat co nejvyšší účinnost. Jeden optimální bod je v místě nízkých průtoků a označíme ho Q_1 . Druhý bod je v místech vysokých průtoků a označíme ho Q_2 .

Difuzorem navrženým pro návrhový bod s průtokem Q_1 získáme maximální účinnost v tomto bodě. Jestliže ale bude potřeba provozovat čerpadlo v bodě vysokých průtoků, tedy v bodě Q_2 , dojde k výraznému poklesu účinnosti. Stejně, jen naopak to bude v případě použití difuzoru navrženého pro návrhový bod s průtokem Q_2 .

Pokud je potřeba čerpadlo střídavě provozovat v obou pracovních bodech Q_1 i Q_2 , nabízí se řešení s využitím dvojího tvarování lopatek. Navrhujeme dvě různé lopatky a tím pádem i dva různé kanály. Kanál, který by se použil v difuzoru pro návrhový bod s Q_1 a kanál, který by se použil v difuzoru pro bod Q_2 . Tyto dva různé kanály umístíme střídavě vedle sebe. Vznikne tak kombinovaný difuzor navržený pro dva pracovní body.

Jde o kompromisní řešení. V ideálním případě (obr. 3.17) by byla maximální účinnost kombinovaného difuzoru uprostřed mezi průtoky Q_1 a Q_2 . V návrhových bodech by ale zůstala účinnosti stále dostatečně vysoká. Dosáhlo by se tak vysokých účinností v širším pásmu průtoků, tedy i pracovních bodů.



Obr. 3.17 Ideální účinnostní charakteristika (hodnoty jsou ilustrativní)

4 Návrh difuzoru pro dva pracovní body v praxi

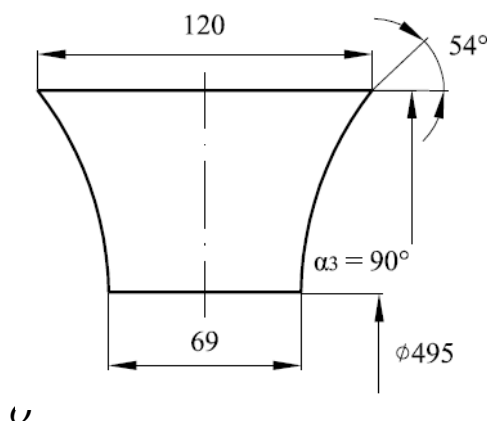
Jak bylo zmíněno v kapitole 3.6, k návrhu difuzoru pro dva pracovní body je nejdříve potřeba navrhnu dva difuzory klasické. Jeden pro nízký průtok a jeden pro vysoký průtok. Ty pak spojit dohromady.

Difuzory budou mít šířku b popsanou nelineární rovnicí. Budeme tedy používat znalosti z kapitoly 3.2.3 a 3.2.4.

Základní rozměry difuzoru stanice Budkovce jsou zapsány v tabulce 4.1.

Tab 4.1 Základní rozměry difuzoru

r_3	0,2475 m
r_4	0,32 m
b_2	0,05 m
b_3	0,069 m
b_4	0,12 m



Obr. 4.1 Základní rozměry difuzoru

K návrhu difuzoru byly použity programy Microsoft Excel a Autodesk Inventor.

4.1 Návrh proudnice difuzoru pro vysoký průtok

Difuzor na vysoký průtok bude navrhován na pracovní bod při průtoku $Q = 615$ l/s a dopravní výšce $H = 250$ m při celkové účinnosti $\eta = 0,75$ a otáčkách $n = 2980$ min⁻¹. Všechny známé a vypočtené hodnoty můžeme zapsat do tabulky 4.2.

Tab. 4.2 Zadané a vypočtené hodnoty

r_3	0,2475 m
r_4	0,32 m
b_2	0,05
b_3	0,069 m
b_4	0,12 m
H	250 m
Q	0,615 m ³ /s
η	0,75 -
η_h	0,846 -
n	49,66667 s ⁻¹
g	9,81 m/s ²

Výpočet hydraulické účinnosti:

$$\eta_h = \sqrt{\eta} - 0,02 \quad [-]$$

Při návrhu budeme postupovat podle kapitoly 3.2.3. Nejprve tedy napíšeme rovnici polynomu $b = b(r)$:

$$b = a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1$$

Konstanty a_1 , b_1 , c_1 a d_1 vypočteme zavedením počátečních podmínek:

$$\text{pro } r = r_3 \quad \text{je} \quad \frac{db}{dr} = 0$$

$$\text{pro } r = r_4 \quad \text{je} \quad \frac{db}{dr} = tg(\alpha)$$

$$\text{pro } r = r_3 \quad \text{je} \quad b = b_3$$

$$\text{pro } r = r_4 \quad \text{je} \quad b = b_4$$

K výpočtu výsledných vzorců se použije program Microsoft Excel a vznikne tak nová tabulka 4.3:

Tab. 4.3 Výpočet konstant

a_1	8,787349
b_1	2,541045
c_1	-2,872658
d_1	0,491104

Protože je výpočet rovnic velmi složitý, může snadno dojít k chybám. Provedeme tedy kontrolu výpočtu. Již známé hodnoty dosadíme do původní rovnice, ze které jsme vycházeli. Výpočet je správný, pokud se pravá strana bude skutečně rovnat straně levé. Musí tedy platit následující rovnost:

$$a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1 - b = 0$$

Pro případ difuzoru navrhovaného na návrhový bod při průtoku 615 l/s můžeme psát:

$$a_1 r_3^3 + b_1 r_3^2 + c_1 r_3 + d_1 - b_3 = 8,787349 \cdot 0,2475^3 + 2,541045 \cdot 0,2475^2 - \\ - 2,872658 \cdot 0,2475 + 0,491104 - 0,069 = 0$$

Další neznámou konstantou, která vznikla v důsledku iterování, je **konstanta C_0** . Pro její výpočet musíme znát číselné hodnoty konstant a_1 , b_1 , c_1 a d_1 . Připomeňme vzorec pro výpočet konstanty C_0 , vyplývající z rovnice 3.13 po zavedení okrajové podmínky $\varphi = 0^\circ$, $r = r_3$:

$$C_0 = a_1 \frac{r_3^3}{3} + b_1 \frac{r_3^2}{2} + c_1 r_3 + d_1 \cdot \ln(r_3) = \frac{8,787349 \cdot 0,2475^3}{3} + \frac{2,541045 \cdot 0,2475^2}{2} - \\ - 2,872658 \cdot 0,2475 + 0,491104 \cdot \ln(0,2475) = -1,2745$$

Konstanty K_1 a K_2 vypočteme z rovnic 3.3 a 3.4:

$$K_1 = \frac{gH}{\eta_h 2\pi n} = \frac{9,81 \cdot 250}{0,8466 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 49,667} = 9,289252$$

$$K_2 = \frac{Q}{2\pi} = \frac{0,615}{2\pi} = 0,09788$$

Nyní máme všechny potřebné konstanty vypočtené. Můžeme přejít k samotnému výpočtu proudnice. Připomeňme vzorec použité k tomuto výpočtu:

$$f(r) = a_1 \frac{r^3}{3} + b_1 \frac{r^2}{2} + c_1 r + d_1 \cdot \ln(r) - \frac{K_2}{K_1} \varphi - C_0$$

$$f'(r) = a_1 r^2 + b_1 r + c_1 + \frac{d_1}{r}$$

$$r_{k+1} = r_k - \frac{f(r_k)}{f'(r_k)} \quad (4.1)$$

Ve vzorcích je proměnná hodnota poloměr r . Tento poloměr se bude měnit podle hodnoty úhlu φ . Při počítání si zvolíme hodnoty úhlu φ a z nich pak získáme poloměry. Velikosti kroků mezi jednotlivými úhly φ volíme dostatečně malé, aby nedošlo k chybě způsobené numerickou metodou řešení.

Na obr. 4.2 je část tabulky z programu Microsoft Excel. Celá tabulka je v příloze č. 2.

- a) **Šedě označené sloupce** jsou pouze informativní a představují kružnice poloměrů r_3 a r_4 . Jsou zde vypočítány proto, aby ohraničily lopatku a obrázek znázorňující proudnici byl přehlednější.

$$\begin{aligned} R_{3x} &= \cos(\varphi) \cdot r_3 & R_{3y} &= \sin(\varphi) \cdot r_3 \\ R_{4x} &= \cos(\varphi) \cdot r_4 & R_{4y} &= \sin(\varphi) \cdot r_4 \end{aligned}$$

- b) **Zeleně označené sloupce** jsou velmi důležité. Představují výpočet proudnice difuzoru. Hodnoty úhlů φ jsou voleny a z nich jsou vypočteny poloměry r (φ) podle vzorce 4.1, tedy Newtonovou metodou pro řešení nelineárních rovnic.

- c) **Modře vybarvené sloupce** je vykreslení proudnice - poloměrů r (φ) do kartézského souřadnicového systému x, y . Rovnice pro výpočet jsou obdobné rovnicím z a).

$$r_x = \cos(\varphi) \cdot r \quad r_y = \sin(\varphi) \cdot r$$

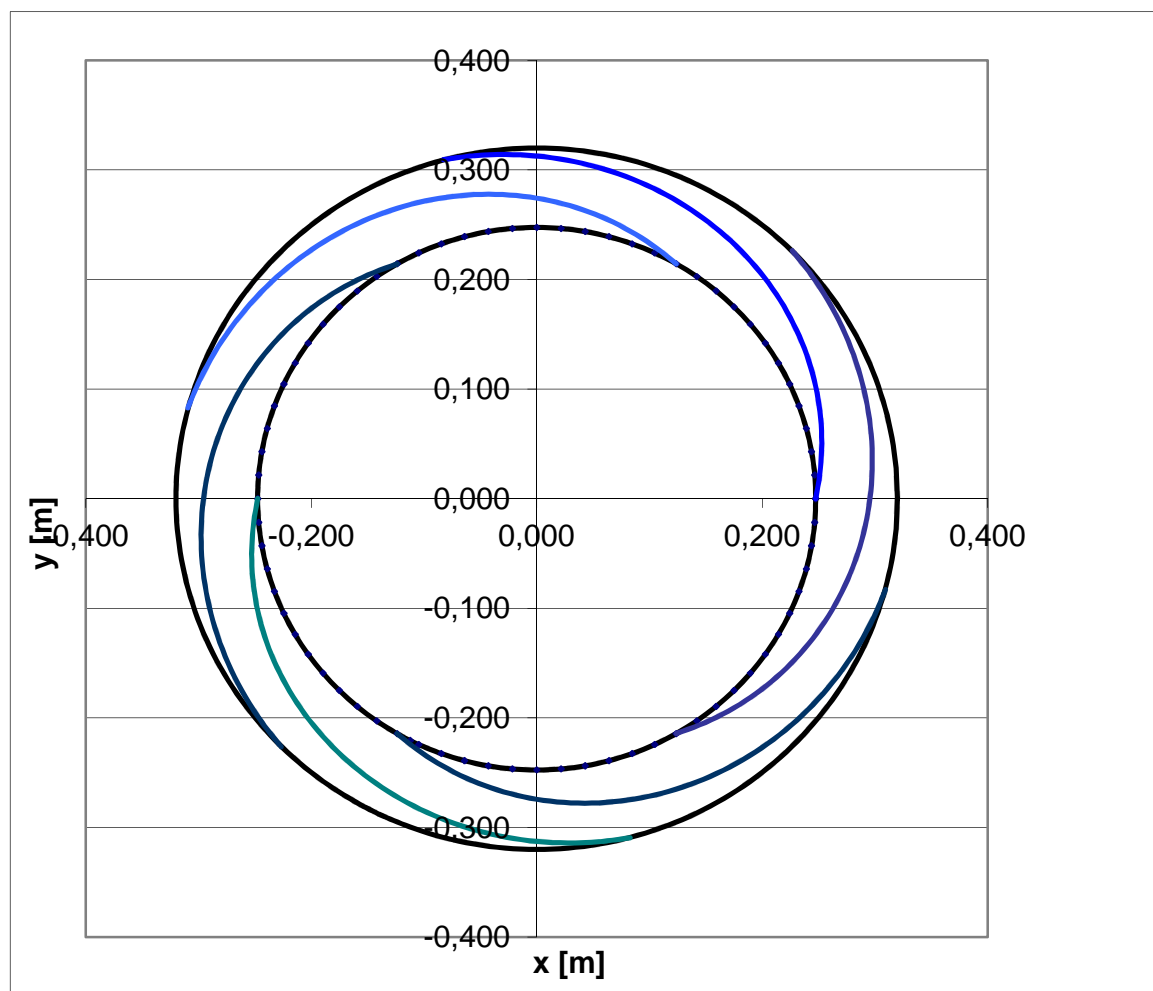
Pořadová čísla 1., 2. znamenají číslo lopatky. Protože řešíme 6-ti lopatkový difuzor, budou se lopatky každých 60° opakovat. Pro lopatku číslo 2 bude v závorce goniometrické funkce $\varphi + 60^\circ$, pro lopatku 3 bude $\varphi + 120^\circ$, apod.

R_{3x}	R_{4x}	R_{3y}	R_{4y}	φ [°]	φ [rad]	r [m]	1. r_x	1. r_y	2. r_x	2. r_y
0,248	0,320	0,000	0,000	0	0,000	0,24750	0,2475	0,0000	0,12375	0,21434
0,247	0,319	0,022	0,028	5	0,087	0,25205	0,2511	0,0220	0,10652	0,22844
0,244	0,315	0,043	0,056	10	0,175	0,25668	0,2528	0,0446	0,08779	0,24120
0,239	0,309	0,064	0,083	15	0,262	0,26125	0,2523	0,0676	0,06762	0,25234
0,233	0,301	0,085	0,109	20	0,349	0,26570	0,2497	0,0909	0,04614	0,26166
0,224	0,290	0,105	0,135	25	0,436	0,27000	0,2447	0,1141	0,02353	0,26897
0,214	0,277	0,124	0,160	30	0,524	0,27413	0,2374	0,1371	0,00000	0,27413
0,203	0,262	0,142	0,184	35	0,611	0,27809	0,2278	0,1595	-0,02424	0,27703

Obr. 4.2 Část tabulky výpočtu difuzoru pro vysoký průtok

Pokud máme hotovou tabulku, můžeme vykreslit tvary všech šesti proudnic v grafu, tak jak je ukázáno na obrázku 4.3. Černá barva odpovídá šedým sloupcům a), modře zbarvené proudnice odpovídají sloupcům modrým c). Odstíny modré představují proudnice podle počátečního úhlu.

Tímto jsme získali tvary proudnic, které tvoří základ lopatek.



Obr. 4.3 Vykreslení proudnic do grafu

Provedeme kontrolu, abychom se ujistili, že proudnice jsou skutečně správně spočítané. K tomu využijeme znalostí z kapitoly 3.4.

Připomeňme si vzorce potřebné pro tuto kontrolu – vzorce pro unášivé c_u a meridiální c_m složky celkové rychlosti:

$$c_u = \frac{gh}{2\pi nr\eta_h}$$

$$c_m = \frac{Q}{2\pi rb}$$

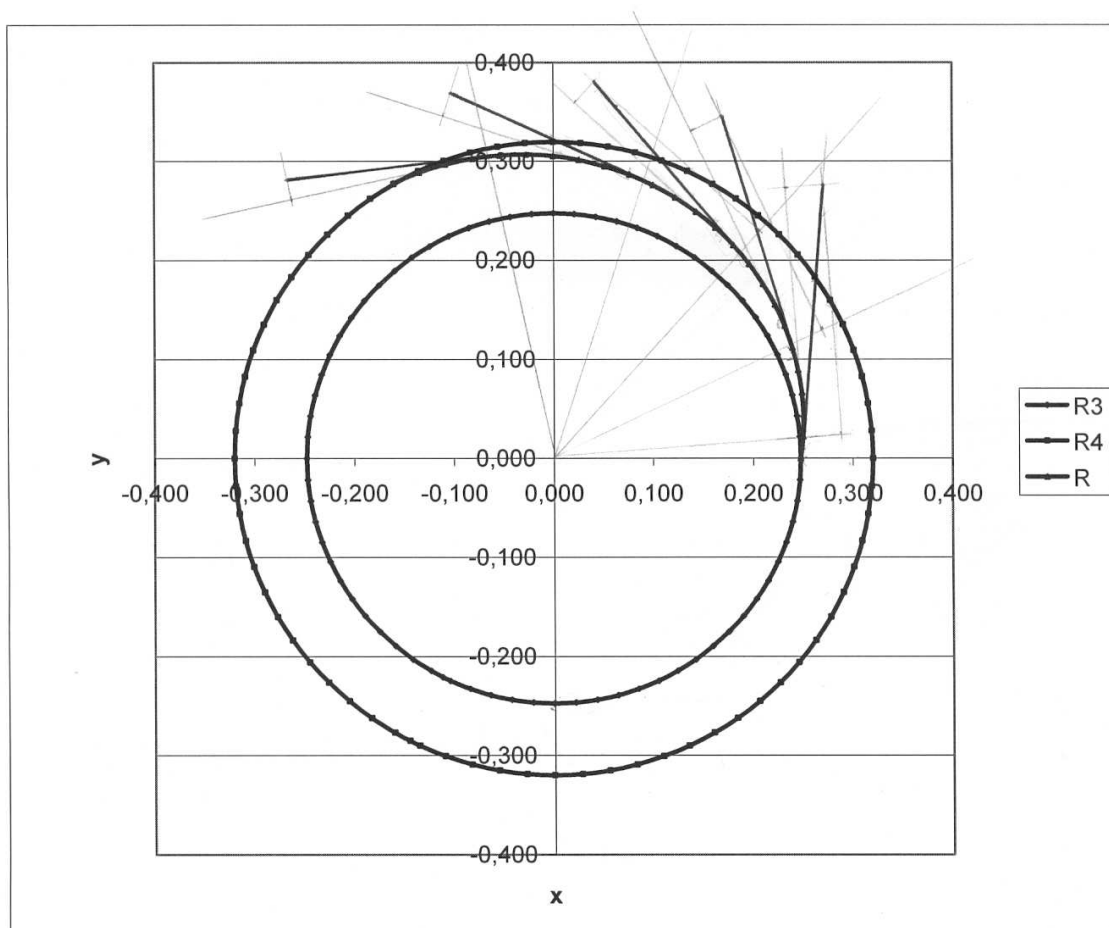
Pro základní proudnici s počátkem v $\varphi = 0^\circ$ vypočteme hodnoty rychlostí alespoň pro 5 poloměrů r a zakreslíme je do obrázku 4.3. Jde o vektorový součet rychlostí c_u a c_m .

Vypočtené rychlosti c_u a c_m pro případ difuzoru pro vyšší průtok je v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Hodnoty rychlostí c_u a c_m

č. bodu	r	c_m	c_u	b
1	0,25	0,945	37,157	0,069
2	0,265	0,857	35,054	0,072
3	0,28	0,739	33,176	0,079
4	0,295	0,612	31,489	0,090
5	0,31	0,494	29,965	0,107

Pět poloměrů, pro které jsme vypočítali hodnoty rychlostí, odpovídá pěti úhlům φ . Tyto úhly zakreslíme (viz obr. 4.4) a od místa kde čára úhlu protíná proudnici, zakreslujeme rychlosti. Meridiální rychlost má stejný směr, jako čára úhlu. Unášivá rychlost je na rychlost meridiální, a tudíž i na čáru úhlu, kolmá. Rychlosti pak vektorově sečteme a získáme velikost a hlavně směr celkové rychlosti. Pokud je směr celkové rychlosti tečný na proudnici, je řešení správné.



Obr. 4.4 Kontrola správnosti výpočtu proudnic

4.2 Návrh proudnice difuzoru pro nízký průtok

Při návrhu druhého difuzoru postupujeme naprosto totožně jako u prvního difuzoru. Výpočet je navíc zkrácen o řešení konstant a_1 , b_1 , c_1 , d_1 a C_0 , protože neobsahují žádné proměnné veličiny. Můžeme tedy rovnou psát tabulku 4.5.

Difuzor na vysoký průtok bude navrhován na pracovní bod při průtoku $Q = 415$ l/s a dopravní výšce $H = 270$ m při celkové účinnosti $\eta = 0,79$ a otáčkách $n = 2980$ min⁻¹. Všechny známé a vypočtené hodnoty můžeme zapsat do tabulky 4.6.

Tab. 4.5 Hodnoty neměnných konstant

a_1	8,787349
b_1	2,541045
c_1	-2,87266
d_1	0,491104
C_0	-1,2745

Tab. 4.6 Zadané a vypočtené hodnoty

r_2	0,23 m
r_3	0,2475 m
r_4	0,32 m
b_2	0,05 m
b_3	0,069 m
b_4	0,12 m
H	270 m
Q	0,415 m ³ /s
η_c	0,79 -
η_h	0,868819 -
n	49,66667 s ⁻¹
g	9,81 m/s ²

Konstanty K_1 a K_2 se znění a opět je vypočteme z rovnic 3.3 a 3.4:

$$K_1 = \frac{gH}{\eta_h 2\pi n} = \frac{9,81 \cdot 270}{0,8688 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 49,667} = 9,7692$$

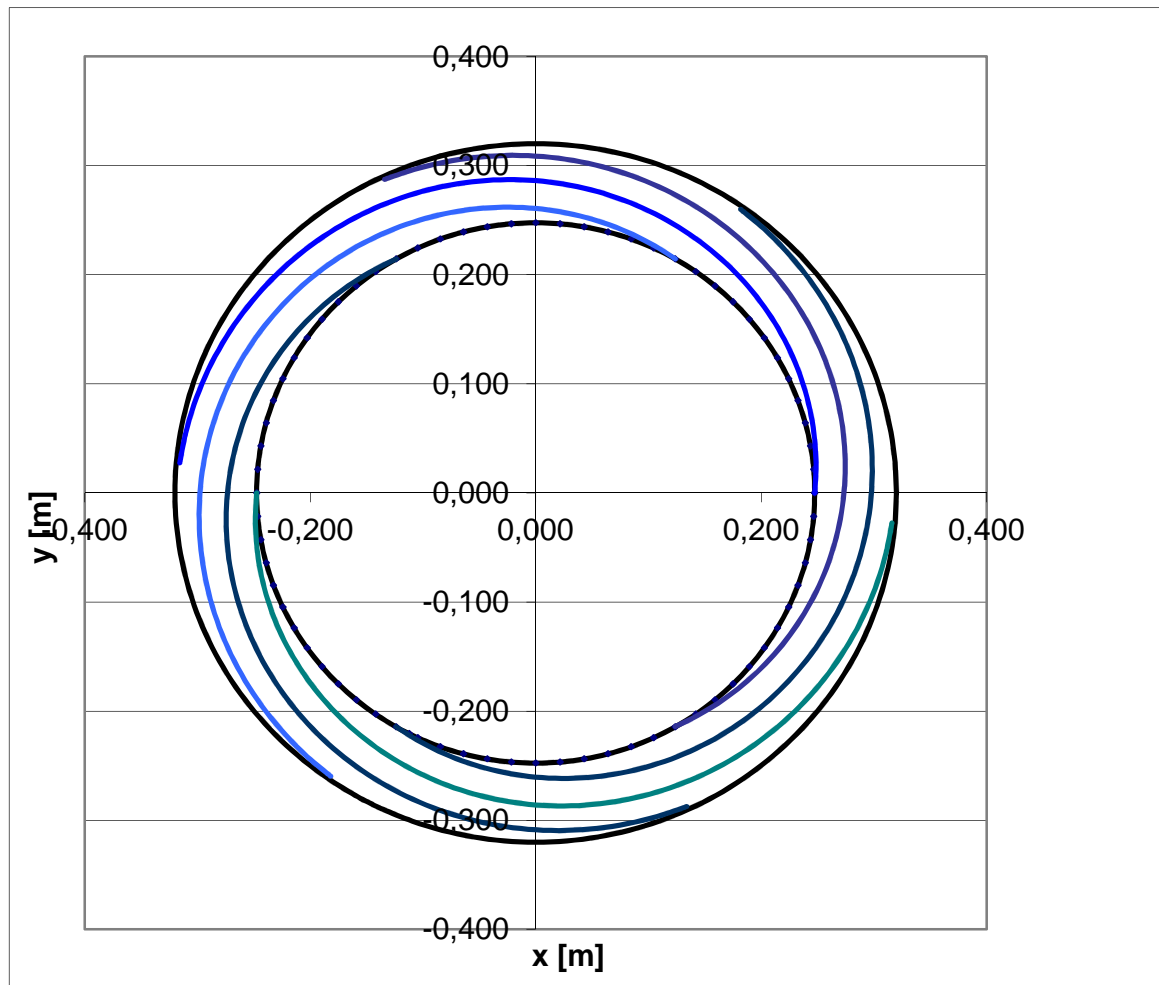
$$K_2 = \frac{Q}{2\pi} = \frac{0,415}{2\pi} = 0,066049$$

Můžeme přejít k samotnému výpočtu proudnice.

Na obr. 4.5 je část tabulky z programu Microsoft Excel. Použití tabulky je shodné s tabulkou popsanou v předchozí kapitole. Celá tabulka je v příloze č. 1.

R_{3x}	R_{4x}	R_{3y}	R_{4y}	φ [°]	φ [rad]	r	1. r_x	1. r_y	2. r_x	2. r_y
0,248	0,320	0,000	0,000	0	0,000	0,24750	0,2475	0,0000	0,12375	0,21434
0,247	0,319	0,022	0,028	5	0,087	0,24962	0,2487	0,0218	0,10549	0,22623
0,244	0,315	0,043	0,056	10	0,175	0,25176	0,2479	0,0437	0,08611	0,23658
0,239	0,309	0,064	0,083	15	0,262	0,25391	0,2453	0,0657	0,06572	0,24526
0,233	0,301	0,085	0,109	20	0,349	0,25608	0,2406	0,0876	0,04447	0,25219
0,224	0,290	0,105	0,135	25	0,436	0,25825	0,2341	0,1091	0,02251	0,25727
0,214	0,277	0,124	0,160	30	0,524	0,26043	0,2255	0,1302	0,00000	0,26043
0,203	0,262	0,142	0,184	35	0,611	0,26261	0,2151	0,1506	-0,02289	0,26161
0,190	0,245	0,159	0,206	40	0,698	0,26479	0,2028	0,1702	-0,04598	0,26077
0,175	0,226	0,175	0,226	45	0,785	0,26697	0,1888	0,1888	-0,06910	0,25787

Obr. 4.5 Část tabulky výpočtu difuzoru pro nízký průtok



Obr. 4.6 Vykreslení proudnic do grafu

Při porovnání obrázků 4.3 a 4.6 je vidět výrazný rozdíl tvarů proudnic. To jestli vypočtené proudnice správně kopírují tvar lopatky je velmi důležité pro účinnost difuzoru. Pokud by proudnice nebyly správně vypočteny a lopatky by tak byly navrženy špatně, mohlo by docházet k nechtěným rázům, odtrhávání proudu a snížení účinnosti.

Kontrola výpočtu je totožná s postupem v předchozí kapitole. Opět připomeňme vzorce potřebné pro tuto kontrolu – vzorce pro unášivé c_u a meridiální c_m složky celkové rychlosti:

$$c_u = \frac{gh}{2\pi nr\eta_h}$$

$$c_m = \frac{Q}{2\pi rb}$$

Vypočtené rychlosti c_u a c_m pro případ difuzoru pro nižší průtok jsou v tabulce 4.7.

Tab. 4.7 Hodnoty rychlostí c_u a c_m

č. bodu	r	c_m	c_u	b
1	0,25	3,826	39,077	0,069
2	0,265	3,470	36,865	0,072
3	0,28	2,991	34,890	0,079
4	0,295	2,477	33,116	0,090
5	0,31	1,999	31,514	0,107

Pokud kontroly vyšly pozitivně, můžeme se pustit do další části, a to návrhu samotné lopatky difuzoru.

4.3 Návrh lopatky difuzoru

Při návrhu lopatky budeme potřebovat znalosti z kapitoly 3.5, vypočtené proudnice, Microsoft Excel a nějaký konstrukční program. A samozřejmě velkou dávku trpělivosti.

Snažíme se o to, aby se kapalina při proudění difuzorem co nejvíce zpomalila. Abychom toho dosáhli, musíme kanál co nejvíce rozšířit směrem k výstupu. Musíme ale dodržet pravidlo, abychom kanál nerozšiřovali příliš a nedocházelo pak k odtrhávání proudu. Toto pravidlo je popsáno vztahem:

$$\frac{\sqrt{S_{i+1}} - \sqrt{S_i}}{l_i} = \frac{1}{6} \div \frac{1}{7} \quad (4.2)$$

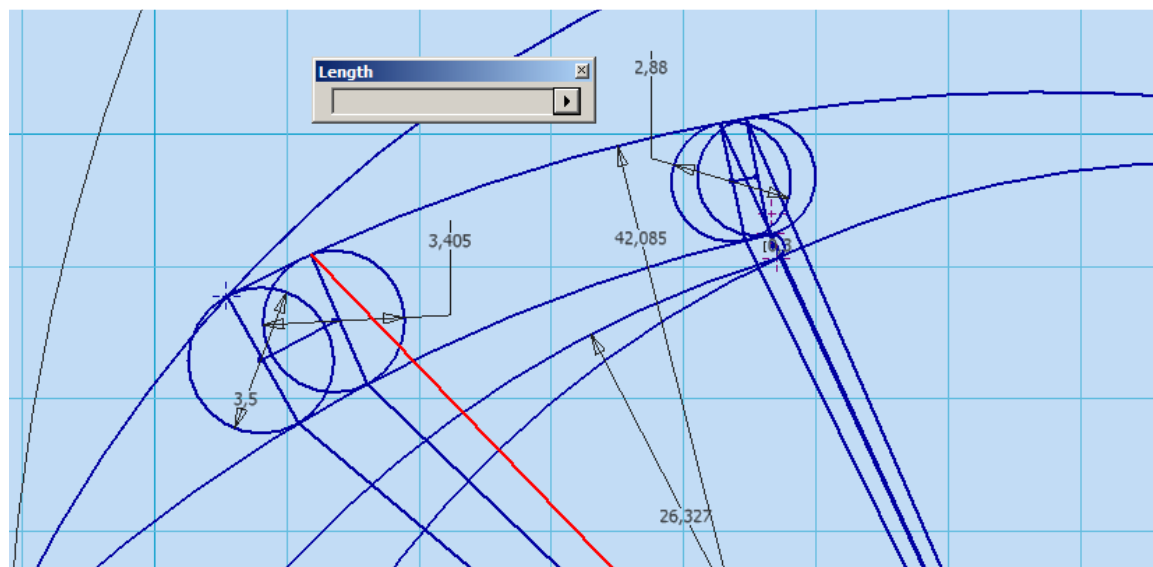
Při návrhu tedy budeme potřebovat znát velikost plochy kanálu S v místě i a $i+1$ a vzdálenost těchto míst l .

Pro plochu platí základní vzorec $S = a \cdot b$, který je závislý na poloměru.

Rozeřší b vypočteme z rovnice $b = a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1$. Poloměr r a šířku a musíme volit tak, aby výsledná hodnota splňovala podmínku danou vztahem (4.2). Je vhodné si tedy udělat v programu MS Excel tabulku, která nám toto řešení vypočítá.

Nejdříve ale musíme do programu Autodesk Inventor vložit body proudnice, které jsme vypočítali v předchozí kapitole 4.2, příp. 4.1 při řešení difuzoru pro vysoký průtok. Z bodů uděláme křivku a snažíme se ji nahradit jednou kružnicí. Na tuto kružnici tečně napojujeme kružnici novou, která bude tvořit kanál. Podle obrázku 3.15 napojujeme novou kružnici od místa i , tedy od místa, kde začíná další lopatka.

Obrázek 4.7 ukazuje, jak lze řešit návrh kanálu za pomoci počítačového programu. Kružnice tvořící kanál volíme ze začátku libovolně a postupně je přizpůsobujeme tak, aby byla splněna podmínka daná rovnicí (4.2). Musíme tedy při každé změně rozměrů změřit poloměry (v obrázku 4.7 naznačeno červeně) a průměry mezi-kružnic, které jsou tečné na kružnice kanálu. Kvůli lepší přesnosti je vhodnější měřit vzdálenost bodů dotyků mezi-kružnic na křivce kanálu, tedy rozměr a .



Obr. 4.7 Návrh kanálu v programu Autodesk Inventor

Pro případ na obrázku 4.7 bychom znali 4 šířky a , dva rozměry l a 8 poloměrů r . Tyto hodnoty zadáme do MS Excel a získáme 4 šířky b a dvě plochy S (jak je zobrazeno na obrázku 4.8).

Hodnoty zadáme do tabulky jak je např. na obrázku 4.8.

- Zeleně označené sloupce označují šířku a změřenou v Inventoru
- Modře označené sloupce jsou poloměry bodů dotyků mezi-kružnic v kanále, bližších ke středu.
- Růžově označené sloupce jsou poloměry bodů dotyků mezi-kružnic v kanále, dál od středu.
- Oranžově zbarvené sloupce označují šířky b , které získáme výpočtem pomocí vzorce $b = a_1 r^3 + b_1 r^2 + c_1 r + d_1$. Dolní indexy a , b odpovídají indexům poloměrů (jsou to šířky v bodě, ve kterém byl měřen i poloměr). Index střední znamená střední hodnotu z předchozích dvou a , b .
- Šedě zbarvené sloupce jsou vypočtené plochy. Výpočet je proveden dvěma způsoby: pomocí střední hodnoty šířky b a pomocí lichoběžníkové metody.
- Červeně vybarvené sloupce jsou délky mezi měřenými body i a $i+1$.
- Žlutě označené sloupce jsou výsledky kontroly návrhu kanálu difuzoru podle vzorce (4.2). Jsou použity dva různé výpočty, ale jak je vidět, rozdíl hodnot je minimální.

šířka a		poloměr blíž ke středu		poloměr dál od středu		šířky b		
a [cm]	a [m]	r _a [cm]	r _a [m]	r _b [cm]	r _b [m]	b _a [m]	b _b [m]	b _{střední} [m]
2,849	0,02849	25,343	0,25343	28,121	0,28121	0,0507	0,0691	0,060
2,879	0,02879	25,471	0,25471	28,273	0,28273	0,0510	0,0707	0,061
3,449	0,03449	28,406	0,28406	31,666	0,317	0,0722	0,115	0,094
3,499	0,03499	28,700	0,2870	32,000	0,320	0,075	0,120	0,098

plochy		lélka		kontrola	
S _{střední} [m ²]	S _{lich} [m ²]	L [cm]	L [m]	kont _{střední}	kont _{lich}
0,0017069	0,001659	0,616	0,00616	0,08883509	0,0899961
0,0017524	0,0017045				
0,0032303	0,0032002	0,95000	0,0095	0,17274816	0,1768839
0,00342	0,0033931				

Obr. 4.8 Tabulka pro výpočet kontroly rozšiřování kanálu difuzoru pro nižší průtok

Při návrhu jsme museli trochu přesáhnout hodnoty $1/6 = 0,166667$ (jak je uvedeno v rovnici (4.2)) z důvodu velkých ztrát vlivem velmi malé šířky kanálu.

Stejně postupujeme při návrhu kanálu difuzoru pro vyšší průtok. Vznikne tabulka jako je na obrázku 4.9.

šířka a		poloměr blíž ke středu		poloměr dál od středu		šířky b		
a [cm]	a [m]	r _a [cm]	r _a [m]	r _b [cm]	r _b [m]	b _a [m]	b _b [m]	b _{střední} [m]
3,362	0,03362	25,345	0,25345	28,662	0,28662	0,0693	0,0834	0,076
3,355	0,03355	25,397	0,25397	28,717	0,28717	0,0694	0,0838	0,077
3,780	0,0378	28,369	0,28369	31,956	0,320	0,0813	0,119	0,400
3,790	0,0379	28,405	0,2841	32,000	0,320	0,082	0,120	0,40000

plochy		lélka		kontrola	
S _{střední} [m ²]	S _{lich} [m ²]	L [cm]	L [m]	kont _{střední}	kont _{lich}
0,0025673	0,0025137	0,417	0,00417	0,0061829	0,0060968
0,0025699	0,0025162				
0,01512	0,0037158	0,12900	0,00129	0,126002	0,1664399
0,01516	0,003742				

Obr. 4.9 Tabulka pro výpočet kontroly rozšiřování kanálu difuzoru pro vyšší průtok

4.4 Návrh difuzoru pro dva pracovní body

Pokud jsme navrhli dva difuzory, každý pro jeden pracovní bod, můžeme se přesunout k vytvoření difuzoru pro dva pracovní body. Teorie z kapitoly 3.6 říká, že musíme vzít z každého difuzoru pro jeden pracovní bod tři kanály a ty střídavě umístit za sebe. Vznikne tak nový šesti-lopátkový difuzor s různě tvarovanými lopátkami.

5 Tvorba CFD modelu

Jestliže jsme úspěšně navrhli geometrii difuzoru, můžeme přejít k počítačovému modelování tohoto problému. To provedeme za pomoci programů Gambit a Ansys Fluent.

Jedná se o úkol vyřešení již nastalého problému na reálném čerpadle, a doba výpočtů byla omezená. Proto byl modelován pouze samotný difuzor bez oběžného kola a spirály. Tím mohlo dojít k mírné chybě výpočtu, protože bylo uvažováno rovnoměrné proudění z kola.

Aby se mohly výsledky porovnat, bylo provedeno modelování tří již zmíněných difuzorů, tedy kombinovaný pro dva pracovní body a dva klasické pro jeden pracovní bod při průtocích $Q = 415 \text{ l/s}$ a $Q = 615 \text{ l/s}$. Čtvrtým modelovaným difuzorem byl 5ti-lopatkový difuzor navržený pro pracovní bod při průtoku $Q = 415 \text{ l/s}$ a který je v současnosti umístěn na díle.

CFD výpočet je složen ze tří částí: preprocessing, solver a postprocessing.

- Preprocessing zahrnuje přípravu geometrie modelu, definici počátečních a okrajových podmínek, nastavování modelů výpočtu, apod.
- Solver je výpočetní řešení, které provádí počítač.
- Postprocessing znamená získávání informací z programu. Tedy získávání potřebných čísel, grafů, obrázků a jejich vyhodnocení.

5.1 Tvorba výpočetní sítě

Výpočetní síť byla modelována v programu Gambit. Protože se jedná o celkem nenáročnou geometrii, byly použity buňky typu *Hex* a schéma *Map*. Navrhovaná geometrie difuzoru začíná již od výstupu oběžného kola – od poloměru r_2 .

Protože se v difuzoru lopatky pravidelně opakují, můžeme využít periodickou funkci. Ta spočívá v tom, že se namodeluje pouze jedna periodicky se opakující část (viz obr. 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4). Výrazně to ulehčí modelování a urychlí výpočetní řešení, protože úloha bude obsahovat mnohem méně buněk.

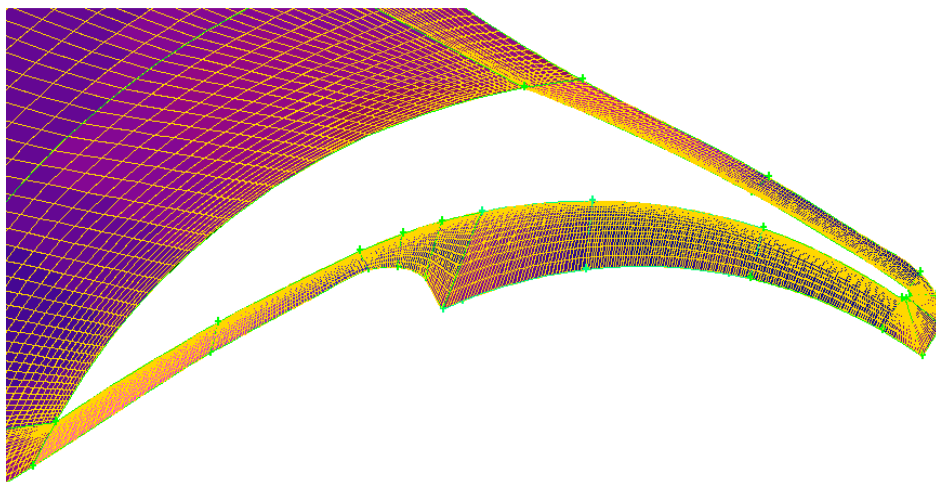
Abychom mohli udělat nějaký periodicky se opakující objem, musíme mít na společných plochách prvního i následujícího objemu naprosto totožnou geometrii. Tedy jak samotné rozměry, tak i počet a tvar buněk.

V Gambitu je kromě namodelování sítě také potřeba určit, které plochy budou obsahovat nějaké okrajové podmínky. Na vstupu do difuzoru, nebo v našem případě na výstupu z čerpadla, se zadá podmínka *velocity inlet*. Na výstupu bude podmínka *pressure outlet*. Aby se dala získat informace o tom, jaké množství proudí jakým kanálem (v případě difuzoru pro dva pracovní body), musíme na vstupy a výstupy kanálů dát podmínku *interior*.

Jsou dva způsoby, jak zadat periodickou podmínku. Prvním je navolení této podmínky rovnou v Gambitu. To ale často dělá potíže. Takže je lepší nejdříve plochy, kde bude periodická podmínka nastavit jako *wall* a až ve výpočetním programu nastavit tyto plochy na periodickou podmínku.

a) Difuzor 6ti-lopátkový pro průtok 415 l/s

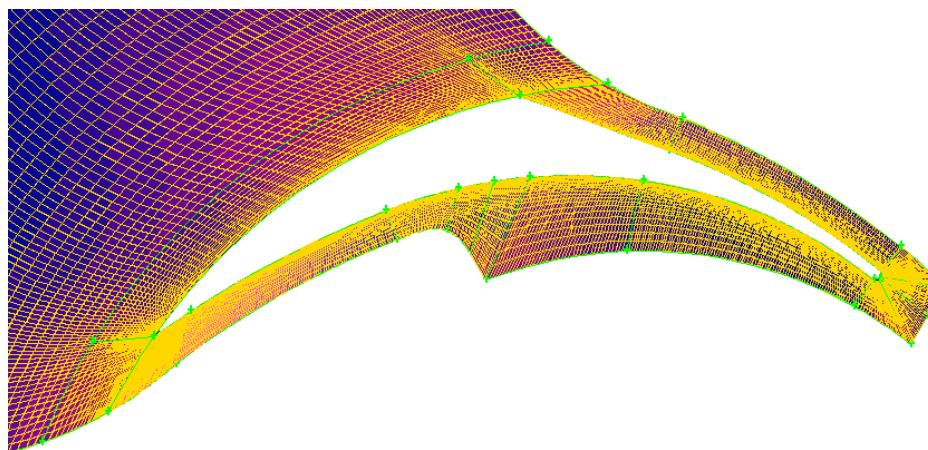
Výpočetní síť difuzoru 6ti-lopátkového pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ je na obrázku 5.1. Počet buněk tohoto objemu je asi 344 100 a nejhorší hodnota kvality buňky 0,722.



Obr. 5.1 Síť 6ti-lopátkového difuzoru pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ l/s

b) Difuzor 6ti-lopátkový pro průtok 615 l/s

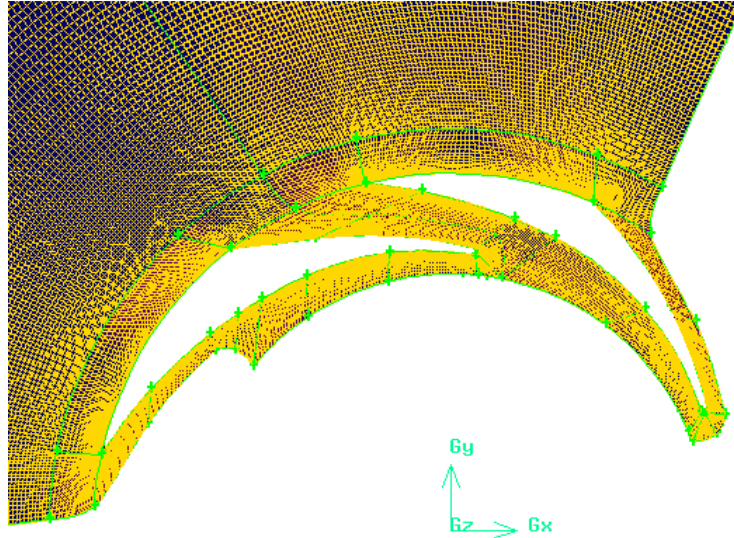
Výpočetní síť difuzoru 6ti-lopátkového pro provozní bod při průtoku $Q = 615$ je na obrázku 5.2. Počet buněk tohoto objemu je asi 348 000 a nejhorší hodnota kvality buňky 0,783.



Obr. 5.2 Síť 6ti-lopátkového difuzoru pro provozní bod při průtoku $Q = 615$ l/s

c) Kombinovaný 6ti-lopátkový difuzor

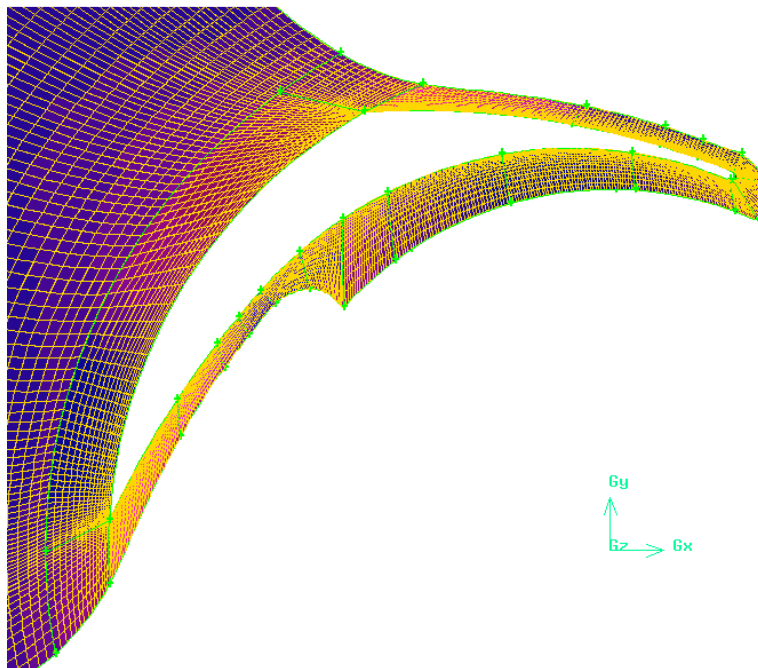
Výpočetní síť difuzoru 6ti-lopátkového pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ je na obrázku 5.3. Počet buněk tohoto objemu je asi 344 100 a nejhorší hodnota kvality buňky 0,722.



Obr. 5.3 Síť kombinovaného difuzoru

d) Difuzor 5ti-lopátkový pro průtok 415 l/s

Výpočetní síť difuzoru 5ti-lopátkového pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ je na obrázku 5.4. Počet buněk tohoto objemu je asi 309 600 a nejhorší hodnota kvality buňky 0,7542.



Obr. 5.1 Síť 5ti-lopátkového difuzoru pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ l/s

5.2 Vstupní rychlost na difuzor

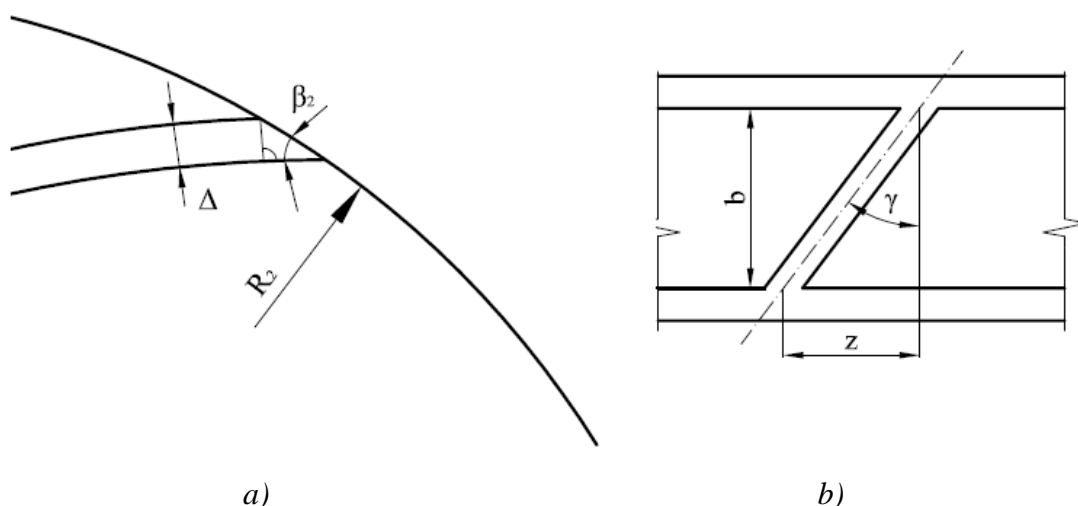
Po namodelování sítě difuzoru je třeba model umístit do programu Ansys Fluent, který simuluje proudění kapaliny, ke kterému v difuzoru dochází. Aby byla simulace proudění správná, musíme programu zadat okrajové podmínky. Těmi jsou rychlosti na vstupu a tlak na výstupu.

5.2.1 Určení okrajových podmínek - teorie

Oběžné kolo před difuzorem způsobuje, že kapalina vstupuje do difuzoru pod určitým úhlem (jak ukazuje obr. 2.2). Proto musíme do programu Ansys Fluent zadat složky celkové rychlosti proudu, a to složku unášivou c_u a složku meridiální c_m .

Čerpadlo má určitou dopravní výšku, kterou je potřeba dodržet. Sloupec kapaliny, který je čerpadlem tlačěn vzhůru vytváří tlak na výstupu stroje.

K získání okrajových podmínek využijeme charakteristiky čerpadla.



Obr. 5.5 Výstup čerpadla, a) výřez výstupní hrany lopatky čerpadla, b) boční pohled na výstupní hranu lopatky čerpadla

Nejdříve ale musíme určit plochu, kterou bude kapalina protékat. Musíme započítat i lopatky, které snižují průtočnou plochu. Podle obrázku 5.5, který zobrazuje lopatku, napíšeme vzorec pro výpočet výstupní plochy čerpadla, kterou kapalina protéká:

$$S_2 = 2\pi R_2 b_2 - \frac{\Delta \cdot z \cdot b_2}{\sin(\beta_2) \cdot \cos(\gamma)} \quad (5.1)$$

Meridiální (radiální) složka absolutní rychlosti c_{m2} se určí jako podíl průtoku a plochy, kterou kapalina protéká.

$$c_{m2} = \frac{Q}{S_2} \quad (5.2)$$

K výpočtu unášivé složky absolutní rychlosti c_{u2} musíme použít charakteristiky čerpadla. Potřebujeme znát hydraulickou účinnost a dopravní výšku.

Hydraulická účinnost:

$$\eta_h = \sqrt{\eta} - 0,02 \quad [-] \quad (5.3)$$

Unášivou (obvodovou) složku absolutní rychlosti c_{u2} dostaneme úpravou Eulerovy rovnice

$$c_{u2} = \frac{gH}{\eta_h u_2} \quad (5.4)$$

Unášivá rychlost u_2 je svíslá na pouze na výstupním poloměru R_2 čerpadla a na otáčkách n . Proto se v průběhu návrhu nemění.

$$u_2 = 2\pi R_2 n \quad (5.5)$$

Vzorec pro výpočet dopravní výšky pro konečný počet lopatek s ohledem na hydraulické ztráty (tření, víření, ráz):

$$H = \frac{u_2^2}{g} \left(\kappa - \frac{\phi}{\operatorname{tg}(\beta_2)} \right) \cdot \eta_h \quad (5.6)$$

Protože počítáme reálný případ čerpadla, tedy případ s konečným počtem lopatek, musíme využít korekci podle Waisera:

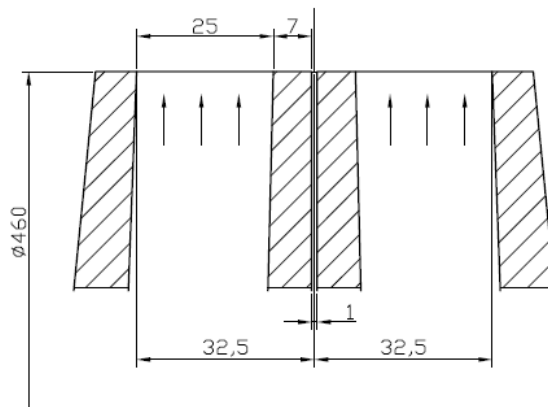
$$\kappa = 1,01 - \frac{0,395 + 0,457 \cdot \sin(\beta_2)}{\sqrt{z}} \quad (5.7)$$

Rychlostní číslo:

$$\phi = \frac{c_{m2}}{u_2} \quad (5.8)$$

5.2.2 Určení okrajových podmínek – praxe

Abychom získali okrajové podmínky pro všechny čtyři difuzory, které počítáme, musíme nahlédnout do charakteristiky čerpadla, pro které difuzor navrhujeme. Charakteristika je zde umístěna jako příloha.



Obr. 5.6 Výstup oběžného kola přečerpávací stanice

Tab. 5.1 Základní rozměry čerpadla

n	49,66667s ⁻¹
g	9,81m/s ²
b2	0,05m
R2	0,230m
β2	26°
γ	15°
Δ	0,0075m
z	7

Na obrázku 5.6 jsou znázorněny základní rozměry výstupu čerpadla, pro které jsou difuzory navrhovány. Další nezbytné rozměry jsou uvedeny v tabulce a jejich význam je vidět na obrázku 5.5.

Tab. 5.2 Vypočtené neměnné hodnoty

S ₂	0,0660573 m ²
u ₂	71,775 [m/s]
κ	0,7849843

V tabulce 5.2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty, které se při výpočtech nemění. Byly získány ze vzorců 5.1, 5.5, 5.7.

Máme zjištěny a vypočteny všechny hodnoty potřebné pro výpočet okrajových podmínek. Ty jsou uvedeny v tabulce 5.3. Hodnoty průtoků volíme, účinnosti vyčteme z charakteristiky čerpadla umístěné v příloze č. 4. Zbylé veličiny dopočítáme podle vzorců uvedených v předchozí kapitole. Modře zbarvené sloupce jsou počáteční podmínky, které budeme zadávat do programu Fluent.

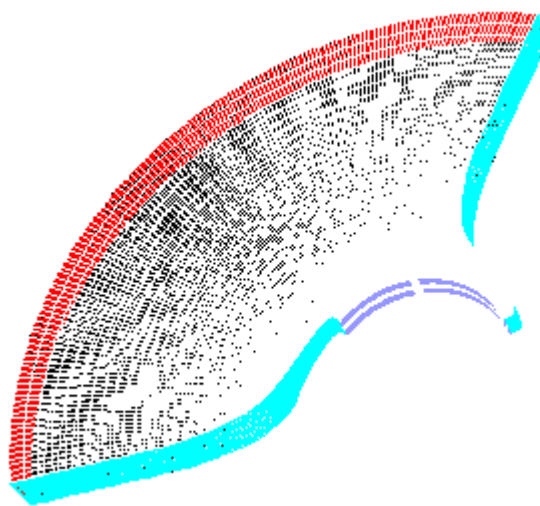
Tab. 5.3 Výpočet okrajových podmínek

Q [l/s]	η [-]	H [m]	η _h [-]	Φ	c _{m2} [m/s]	c _{u2} [m/s]	p _{aH} [Pa]
315	0,75	288,236	0,846025	0,06644	4,7686	46,565	2822503,9
415	0,79	276,271	0,868819	0,08753	6,2824	43,461	2705344,8
515	0,77	253,198	0,857496	0,10862	7,7963	40,357	2479400,5
615	0,75	230,598	0,846025	0,12971	9,3101	37,254	2258097,1
715	0,550	180,302	0,72162	0,1508	10,8239	34,150	1765579,7

5.3 Výpočet proudění v programu Ansys Fluent

Máme navrženy a v Gambitu namodelovány čtyři různé difuzory pro jedno čerpadlo. Okrajové podmínky jsme vypočetli. Nyní musíme provést výpočet proudění kapaliny v jednotlivých difuzorech. Výpočet bude proveden v programu Ansys Fluent 6.3.26.

Z Gambitu exportujeme vytvořenou síť ve formátu .msh a otevřeme ji ve Fluentu. Na obrázku 5.8 můžeme vidět takto načtenou síť difuzoru pro dva pracovní body. Červeně je znázorněna podmínka *pressure outlet*, modře podmínka *velocity inlet* a zelené části představují podmínku *periodic*, tedy plochu, na kterou periodicky navazuje další stejný objem.



Obr. 5.8 Síť kombinovaného difuzoru z Gambitu načtená do Fluentu

5.3.1 Nastavení a okrajové podmínky

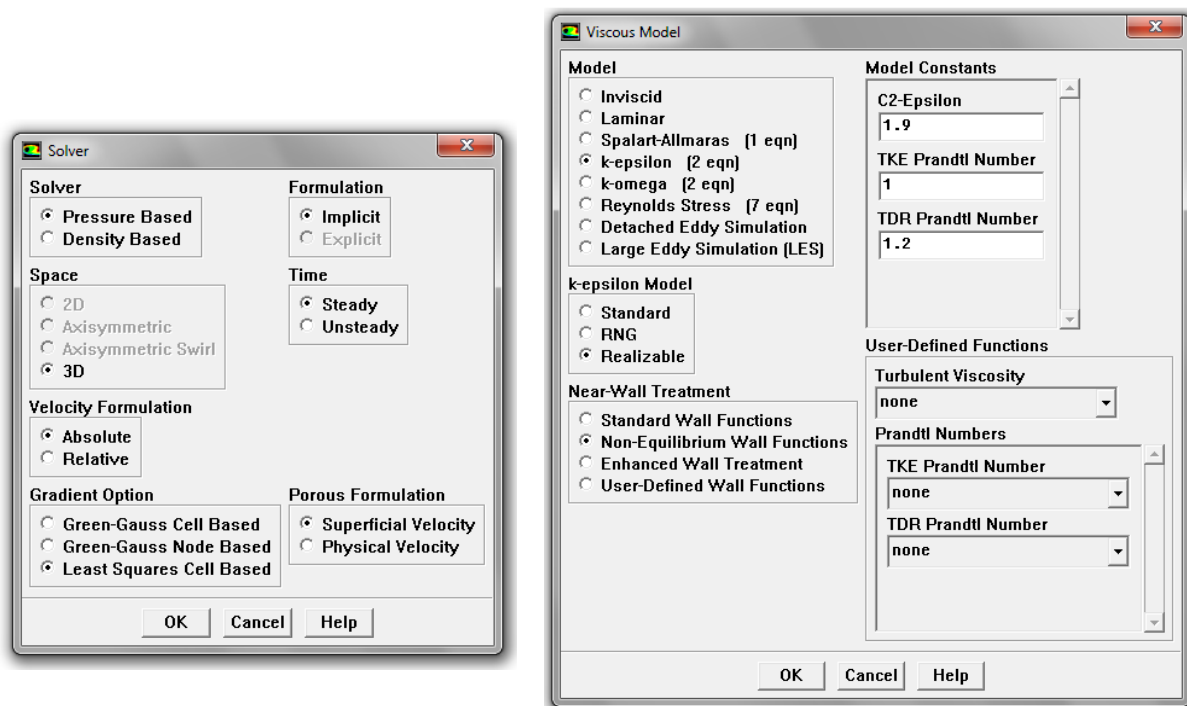
Aby byly difuzory správně vypočteny, musíme zadat následující:

a) **Solver** (Řešič) obr. 5.9a

- 3D, Tlakově orientované, Stacionární, Formulace rychlosti – Absolutní

b) **Models**: použijeme *Viscous* (viskozita) – *k.epsilon* (dvourovnicový), obr. 5.9b

- *Model: Realizable*
- *Near – Wall Treatment* (stěnová funkce): *Non – Equilibrium Wall Functions* (nerovnovážné stěnové funkce)

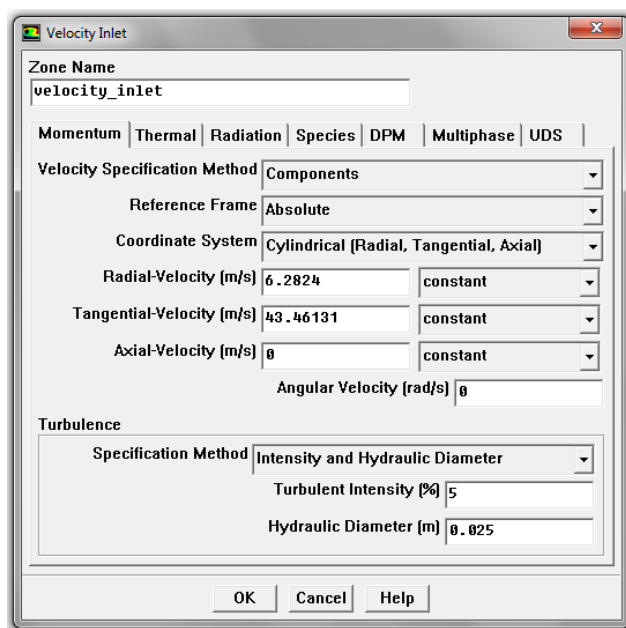


a)

b)

Obr. 5.9 Obrázky z programu Fluent 6.3.26, a) nastavení řešiče, b) nastavení Viskózního modelu

c) **Materials:** *water-liquid*. Sice se bude difuzor používat pro čerpání ropy, ale i přesto použijeme jako proudící materiál vodu. V praxi se pak většinou při čerpání ropy dosahuje i vyšších účinností než při čerpání vody.

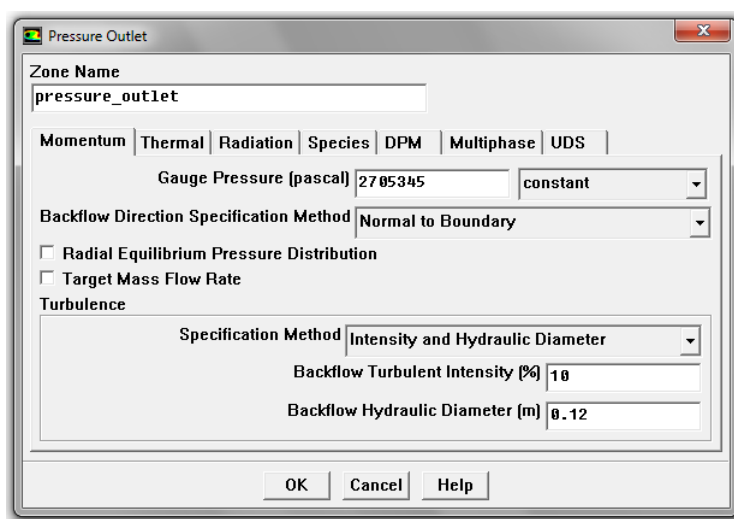


Obr. 5.10 Okrajová podmínka Velocity inlet

d) **Boundary condition** (okrajové podmínky): zadání okrajových podmínek, které jsme vypočítali 5.2.2. (viz obr. 5.10)

- *Velocity inlet*: rychlost vstupující do objemu. Jak bylo zmíněno v kapitole 5.2.2, musíme zadat složky celkové rychlosti c_u a c_m . Jak je zobrazeno na obrázku 5.10, musíme zadat:

- *Velocity Specification Method* (Metoda specifikace rychlosti): *Components*
- *Coordinate System*: *Cylindrical*
- *Turbulence Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter*
- *Turbulent Intensity* (Intenzita turbulencí) = 5 %
- *Hydraulic diameter* (hydraulický průměr) = 0,025 m



Obr. 5.11 Okrajová podmínka Pressure Outlet

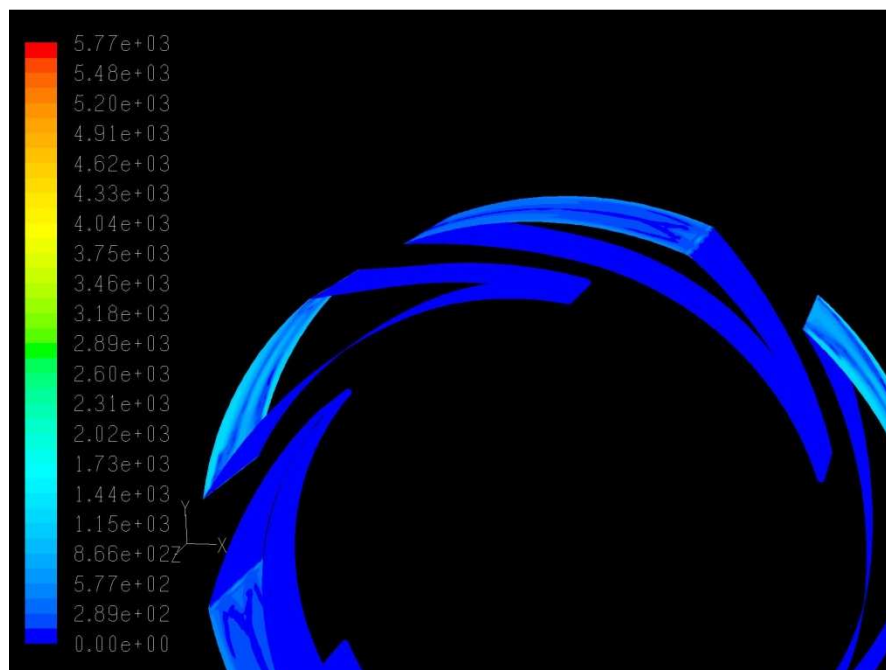
- Pressure outlet je tlak na výstupu způsobený dopravní výškou (obr. 5.11)
 - *Turbulence Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter*
 - *Turbulent Intensity* (Intenzita turbulencí) = 10 %
 - *Hydraulic diameter* (hydraulický průměr) = 0,12 m

e) **Řešení**: *Metoda SIMPLE, Pressure – Standard*

Jak bylo řečeno již výše, je provedeno modelování pouze difuzoru bez oběžného kola a spirály. Počítalo se při stacionárním proudění.

Výpočet probíhal podle tabulky 5.3. Pro každý ze čtyř difuzorů tedy bylo provedeno 5 výpočtů při pěti průtocích. Výpočty iterovaly bez problémů a ke konvergenci stačilo v průměru cca 20 000 kroků.

Na obrázku 5.12 je ukázka hodnoty stěnové funkce y^+ , které jsme při výpočtech dosahovali. Hodnota tohoto parametru by se měla pohybovat $20 < y^+ < 200$.

Obr. 5.12 Vykreslení hodnoty parametru y^+

5.4 Vyhodnocení počítačového modelování

Po několika hodinách výpočtů, které prováděl počítač, můžeme získat výsledky.

Z programu byly vypočteny hodnoty statického a celkového tlaku a rychlosti na vstupu a výstupu difuzoru. Pro určení účinnosti byl použit vzorec zohledňující tlakovou i kinetickou měrnou energii:

$$\eta = \frac{\frac{p_{s2}}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}}{\frac{p_{s1}}{\rho} + \frac{v_1^2}{2}}, \quad (5.9)$$

kde p_s je statický tlak a ρ je hustota.

Pro výpočet ztrát byl použit vzorec:

$$\xi = \frac{2 \cdot (p_{t1} - p_{t2})}{\rho v^2} \quad (5.10)$$

Měrná energie se vypočetla ze vzorce:

$$Y = \frac{p_s}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

Tab. 5.4 Výsledky počítačového modelování

Difuzor 6ti-lopátkový pro průtok Q = 415 l/s											
Q [l/s]	p_{t3} [Pa]	p_{t4} [Pa]	p_{s3} [Pa]	p_{s4} [Pa]	v_3 [m/s]	v_4 [m/s]	Y_3 [J/kg]	Y_4 [J/kg]	ΔY [J/kg]	ξ	η_Y
315	3025799	2876358	2033614	2762286	41,626	15,055	2903,63	2880,60	23,03	0,173	0,992
415	3063967	2796874	2157264	2602288	39,051	19,643	2923,63	2799,89	123,74	0,351	0,958
515	3041130	2620427	2224499	2295100	36,552	25,450	2896,55	2623,08	273,47	0,631	0,906
615	3224583	2453755	2450118	2025867	35,770	29,135	3094,28	2453,94	640,34	1,207	0,793

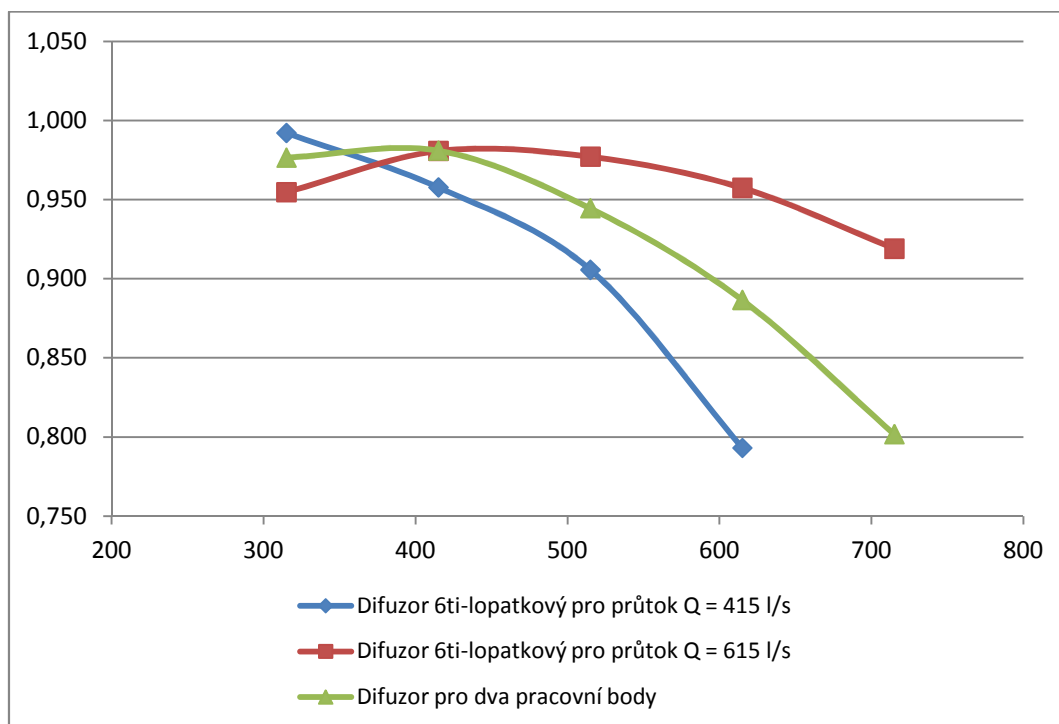
Difuzor 6ti-lopátkový pro průtok Q = 615 l/s											
Q [l/s]	p_{t3} [Pa]	p_{t4} [Pa]	p_{s3} [Pa]	p_{s4} [Pa]	v_3 [m/s]	v_4 [m/s]	Y_3 [J/kg]	Y_4 [J/kg]	ΔY [J/kg]	ξ	η_Y
315	3062916	2890241	2049720	2837555	44,257	10,249	3032,76	2895,20	137,56	0,177	0,955
415	2918187	2794956	1978687	2712574	41,776	12,834	2854,86	2799,82	55,03	0,141	0,981
515	2719336	2578768	1864781	2445569	39,357	16,256	2642,62	2582,11	60,51	0,182	0,977
615	2507114	2324237	1741089	2122644	37,013	19,956	2429,21	2325,58	103,63	0,267	0,957
715	2179571	1934195	1498764	1645899	34,760	23,920	2105,60	1934,95	170,65	0,407	0,919

Difuzor pro dva pracovní body											
Q [l/s]	p_{t3} [Pa]	p_{t4} [Pa]	p_{s3} [Pa]	p_{s4} [Pa]	v_3 [m/s]	v_4 [m/s]	Y_3 [J/kg]	Y_4 [J/kg]	ΔY [J/kg]	ξ	η_Y
315	3012608	2858535	2056014	2801011	41,736	10,566	2930,68	2861,88	68,79	0,177	0,977
415	2967966	2793306	2076645	2655217	39,154	16,287	2846,92	2792,64	54,28	0,228	0,981
515	2831808	2553873	2030955	2397838	36,644	17,529	2705,99	2555,80	150,19	0,415	0,944
615	2725166	2312266	2016639	2093300	34,238	20,676	2606,40	2310,82	295,59	0,706	0,887
715	2608708	2011898	1989009	1627796	31,942	27,415	2502,74	2006,53	496,21	1,172	0,802

Difuzor 5ti-lopátkový pro průtok Q = 415 l/s											
Q [l/s]	p_{t3} [Pa]	p_{t4} [Pa]	p_{s3} [Pa]	p_{s4} [Pa]	v_3 [m/s]	v_4 [m/s]	Y_3 [J/kg]	Y_4 [J/kg]	ΔY [J/kg]	ξ	η_Y
315	3082153,5	2896934	2084893	2767307,3	41,963	16,042	2969,09	2900,98	68,11	0,211	0,977
415	3149976,3	2833715,3	2240352,3	2603284	39,367	21,404	3019,27	2837,05	182,22	0,409	0,940
515	3140569,5	2626255,5	2322131	2267816,8	36,849	26,679	3005,24	2627,78	377,46	0,759	0,874
615	3242715,8	2418919,3	2518239,3	1939485,3	34,425	30,906	3115,31	2420,56	694,75	1,393	0,777

V tabulce 5.4 jsou zapsány všechny hodnoty potřebné pro vyhodnocení problému.

Účinnostní charakteristika na obrázku 5.13 ukazuje porovnání účinností jednoho difuzoru kombinovaného a dvou klasických pro jeden návrhový bod při průtoku $Q = 415$ l/s a $Q = 615$ l/s. Je vidět, že charakteristika difuzoru kombinovaného prochází mezi difuzory klasickými.

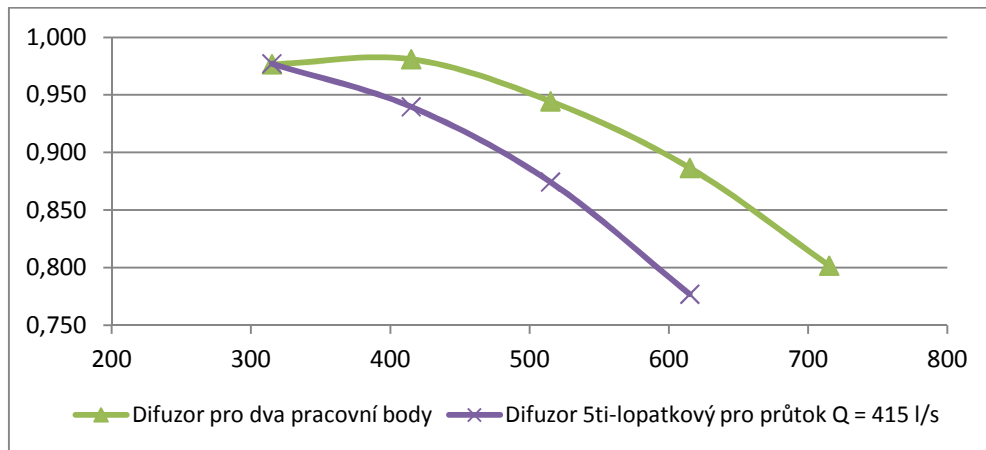


Obr. 5.13 Účinnostní charakteristika

Uvažujme návrhový bod pro vysoký průtok $Q = 615$ l/s. Je dobře vidět, že účinnost kombinovaného difuzoru je horší než při použití klasického difuzoru navrženého na vysoký průtok Q . Zato je účinnost o několik procent vyšší, než při použití difuzoru navrženého pouze pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ l/s.

Charakteristika na obrázku 5.13 nevypadá tak, jak by v ideálním případě vypadat měla. Jak bylo zmíněno výše, při počítačovém modelování difuzorů bylo použito skutečné oběžné kolo, pro které byl difuzor navrhován. Toto oběžné kolo bylo navrženo pro pracovní bod v nízkých průtocích. Proto i výsledky z počítačového modelování jsou ovlivněny tímto ne úplně vhodným oběžným kolem. Maximální účinnosti všech tří difuzorů jsou tak přesunuty mírně doprava, do míst nízkých průtoků.

Obr. 5.14 ukazuje porovnání nového kombinovaného difuzoru se současným stavem, kdy je použit 5ti-lopátkový difuzor navržený pro nízký průtok. Je vidět, že použitím kombinovaného difuzoru dosahujeme lepších účinností ve vysokých průtocích.



Obr. 5.14 Účinnostní charakteristika difuzoru kombinovaného a 5ti-lopátkového

Problém vibrací, které vznikaly při použití difuzoru 8mi-lopátkového difuzoru (další difuzor, který byl navrhnut a umístěn na dílo) navrženého na vysoký průtok, bude také vyřešen pomocí kombinovaného difuzoru. Použití dvojitého tvarování napomáhá snížit pulzace čerpadla díky zařazení kanálů pro nízký průtok. Tyto kanály jsou velmi úzké a utlumují pulzace proudící kapaliny.

5.5 Proudění uvnitř difuzoru pro dva pracovní body

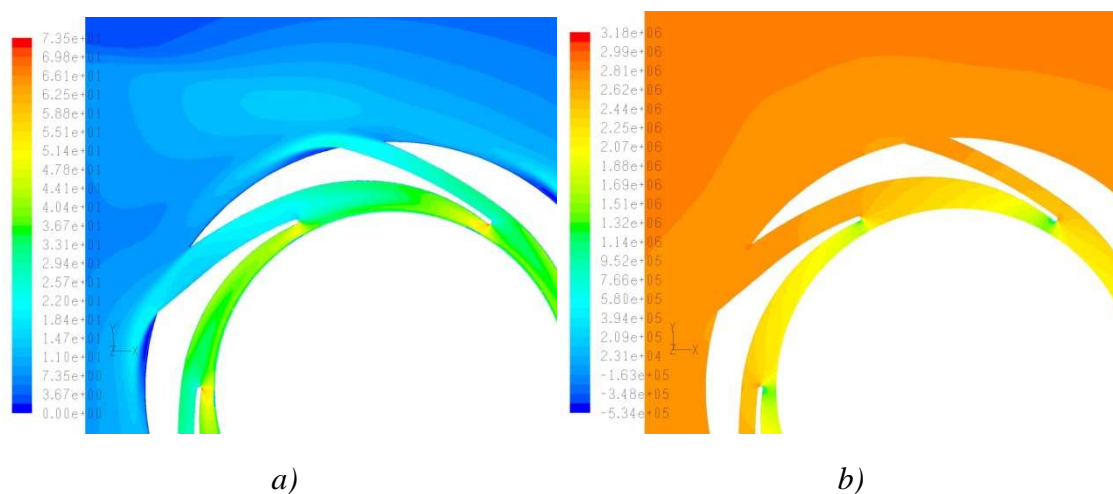
V následující kapitole budou zobrazeny obrázky získané z programu Fluent 6.3.26 pro každý z pěti průtoků počítaných u kombinovaného difuzoru pro dva provozní body.

Pozn.: Při popisu obrázků proudění jsou použity názvy:

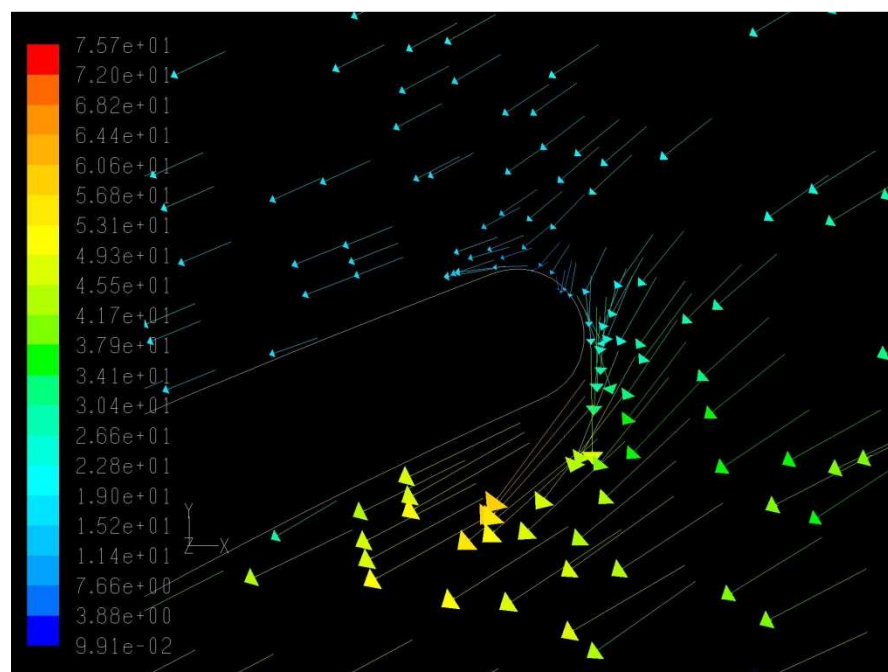
- široký kanál, představující kanál difuzoru navrženého na průtok $Q = 615$ l/s
- úzký kanál, představující kanál difuzoru navrženého na průtok $Q = 415$ l/s

5.5.1 Při průtoku $Q = 315$ l/s

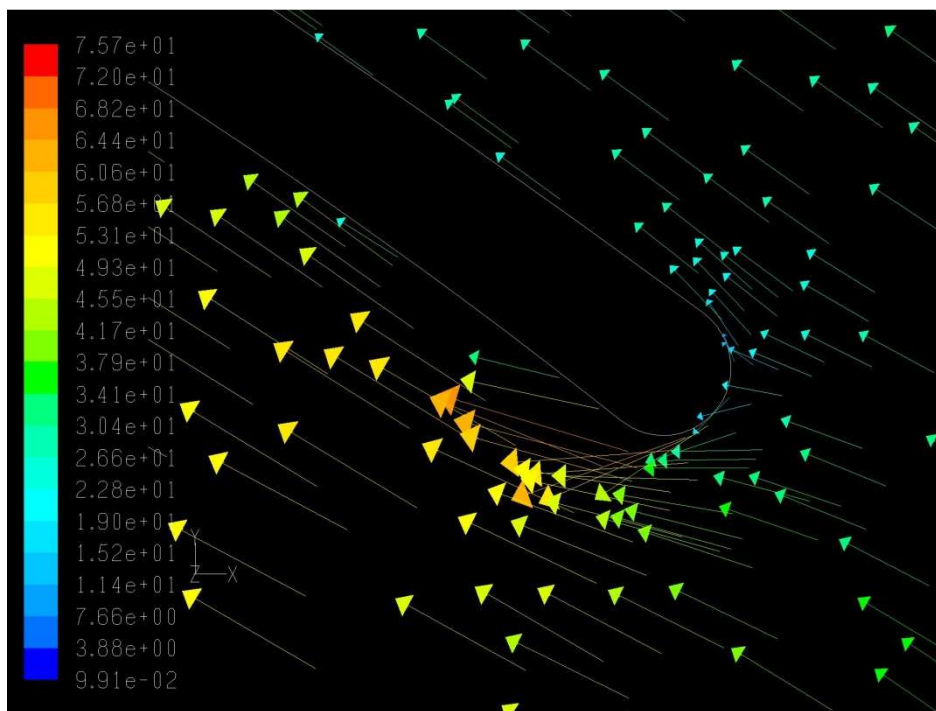
Na obrázcích 5.15a a 5.15b je zobrazena hlavní funkce difuzoru, tedy přeměna kinetické energie kapaliny vycházející z kola na energii tlakovou. Směrem k výstupu dochází k výrazným poklesům rychlostí a zvýšení statického tlaku.



Obr. 5.15 Funkce difuzoru, a) Rychlostí pole v řezu difuzorem, b) pole statického tlaku v řezu difuzorem.



Obr. 5.16 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu

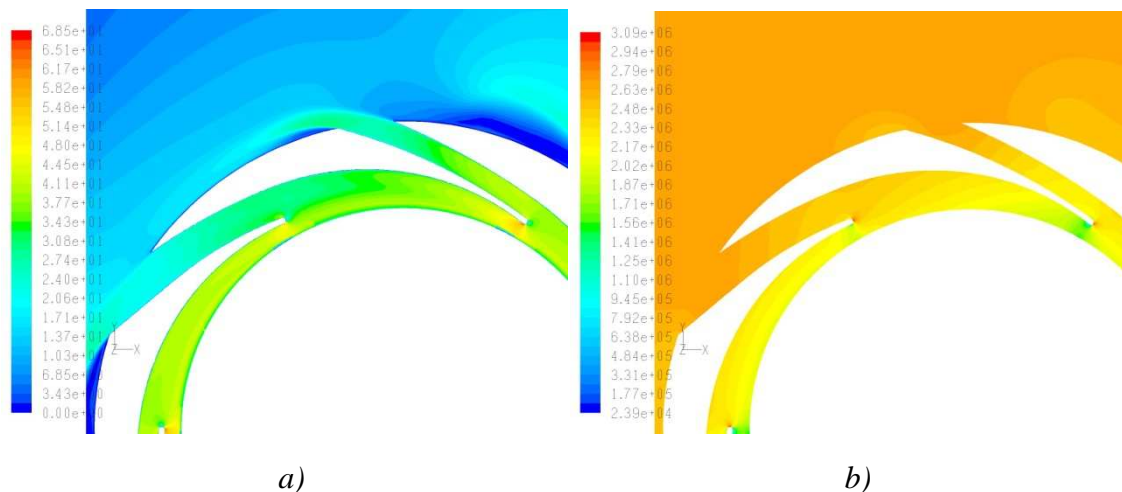


Obr. 5.17 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu

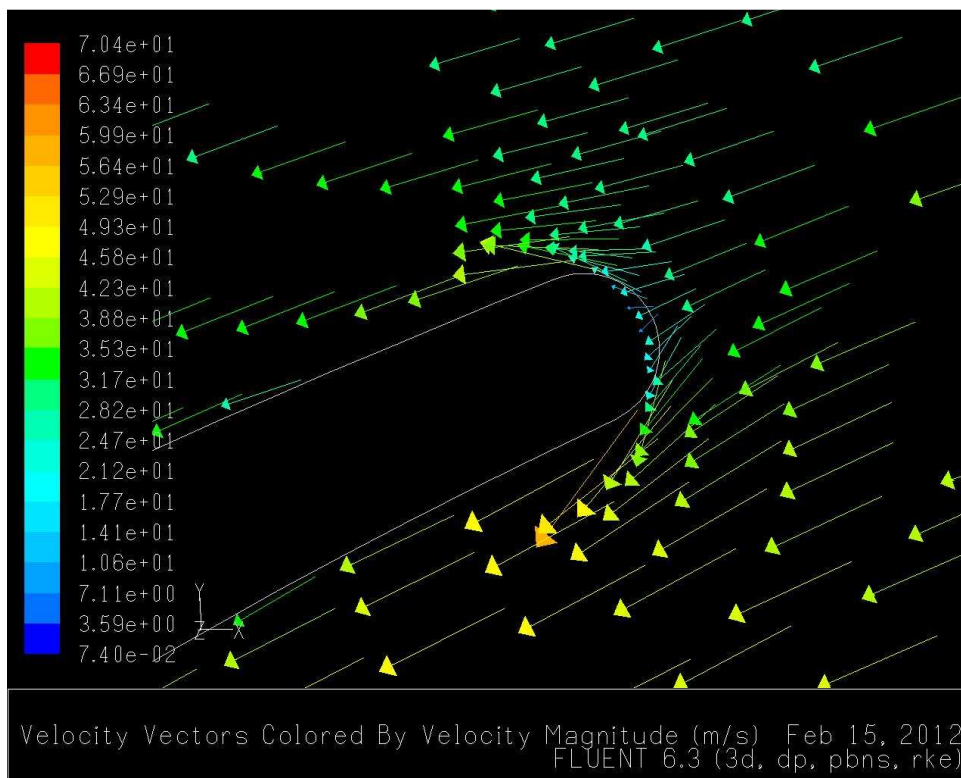
Je zřetelně vidět, že při průtoku $Q = 315$ l/s jsou rychlosti v kanálech velmi malé. Nedochází k rázům, ani odtrhávání proudů.

5.5.2 Při průtoku $Q = 415$ l/s

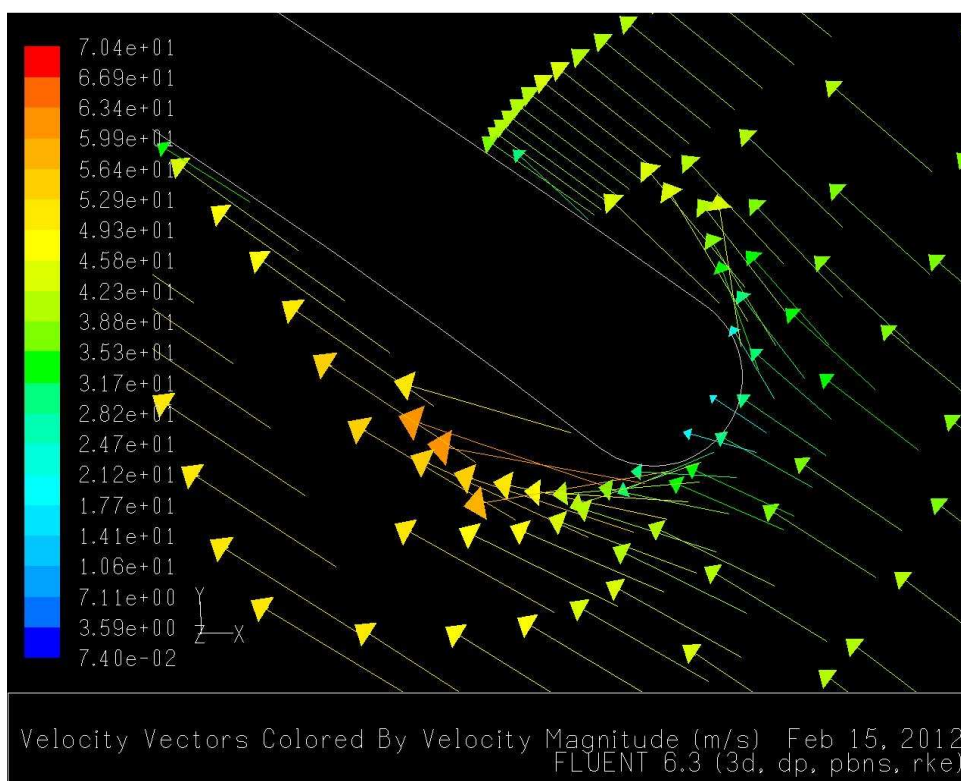
Tento průtok je jedním z návrhových bodů.



Obr. 5.18 Funkce difuzoru, a) Rychlostí pole v řezu difuzorem, b) pole statického tlaku v řezu difuzorem.

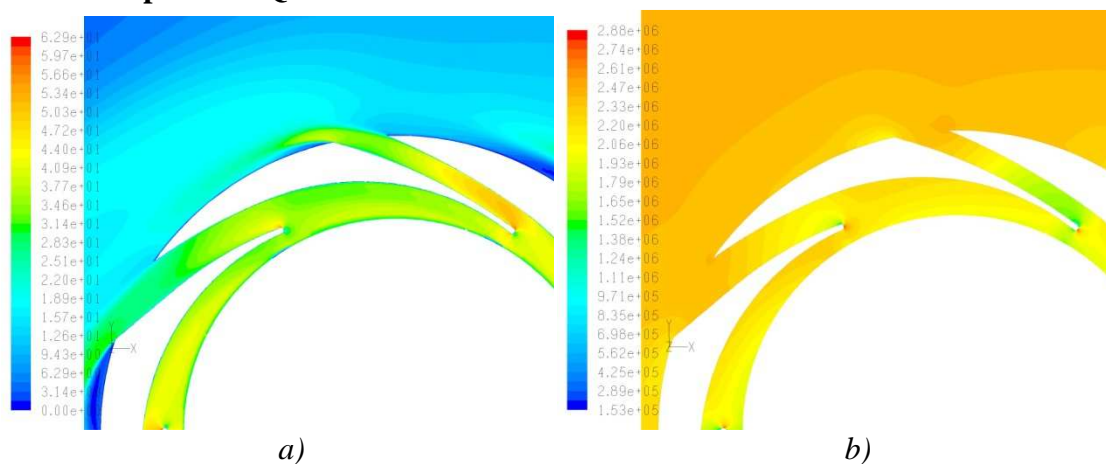


Obr. 5.19 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu

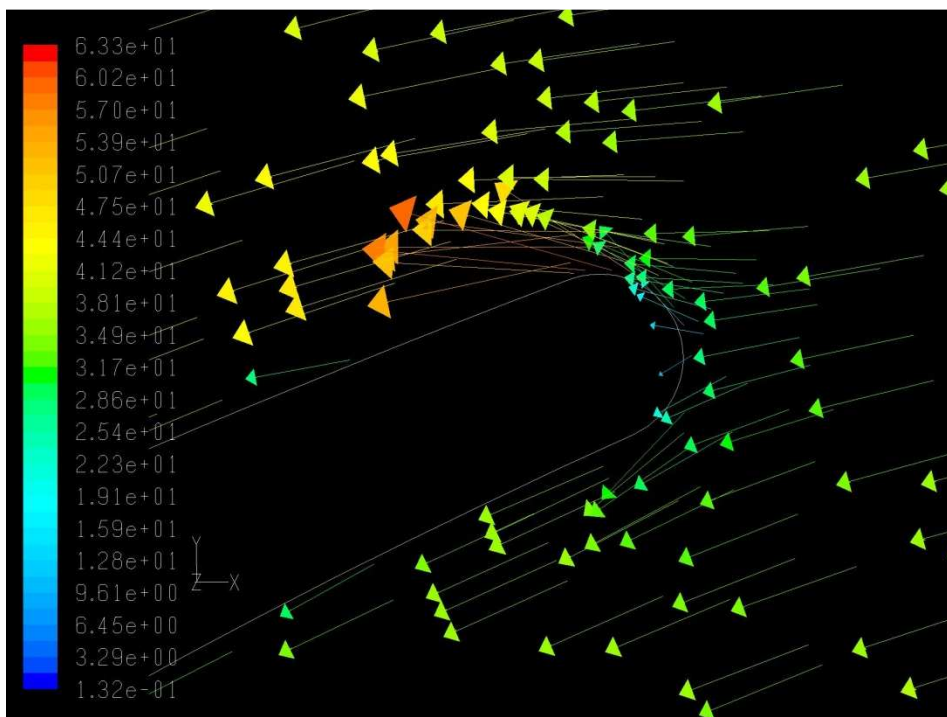


Obr. 5.20 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu

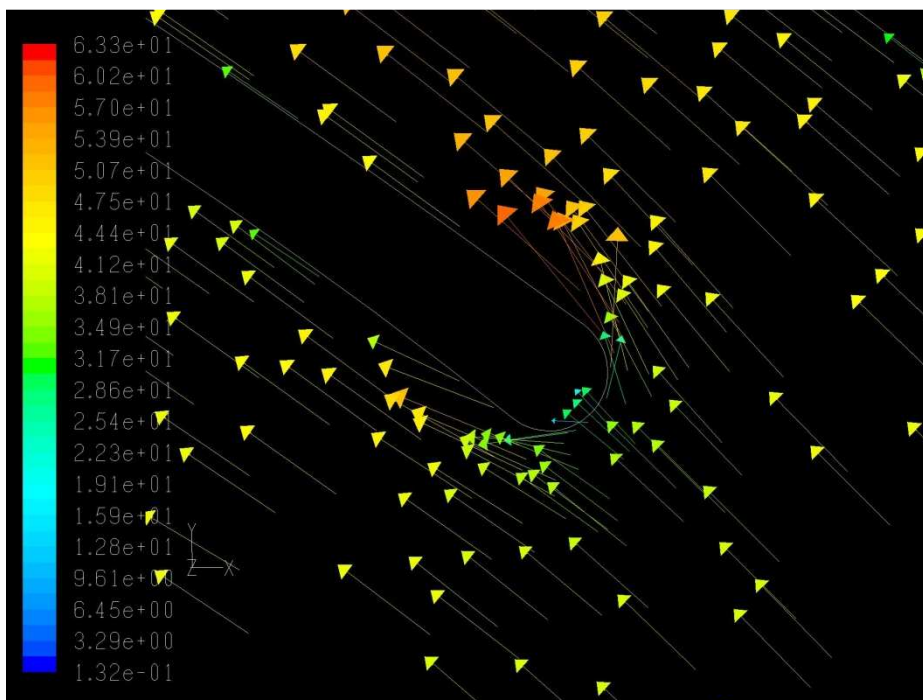
5.5.3 Při průtoku $Q = 515 \text{ l/s}$



Obr. 5.21 Funkce difuzoru, a) Rychlostí pole v řezu difuzorem, b) pole statického tlaku v řezu difuzorem.



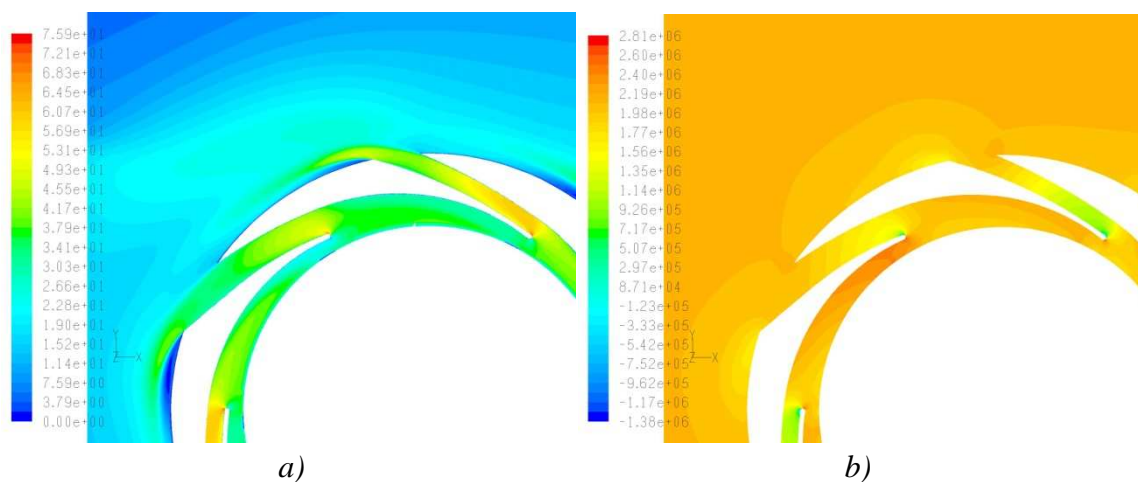
Obr. 5.22 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu



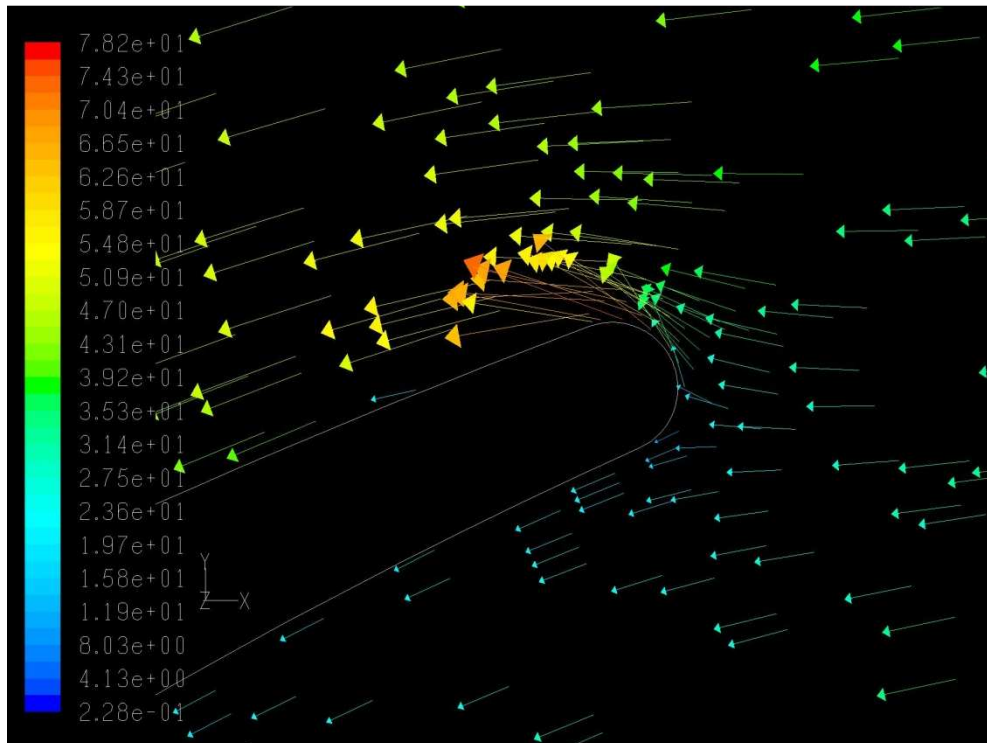
Obr. 5.23 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu

5.5.4 Při průtoku $Q = 615$ l/s

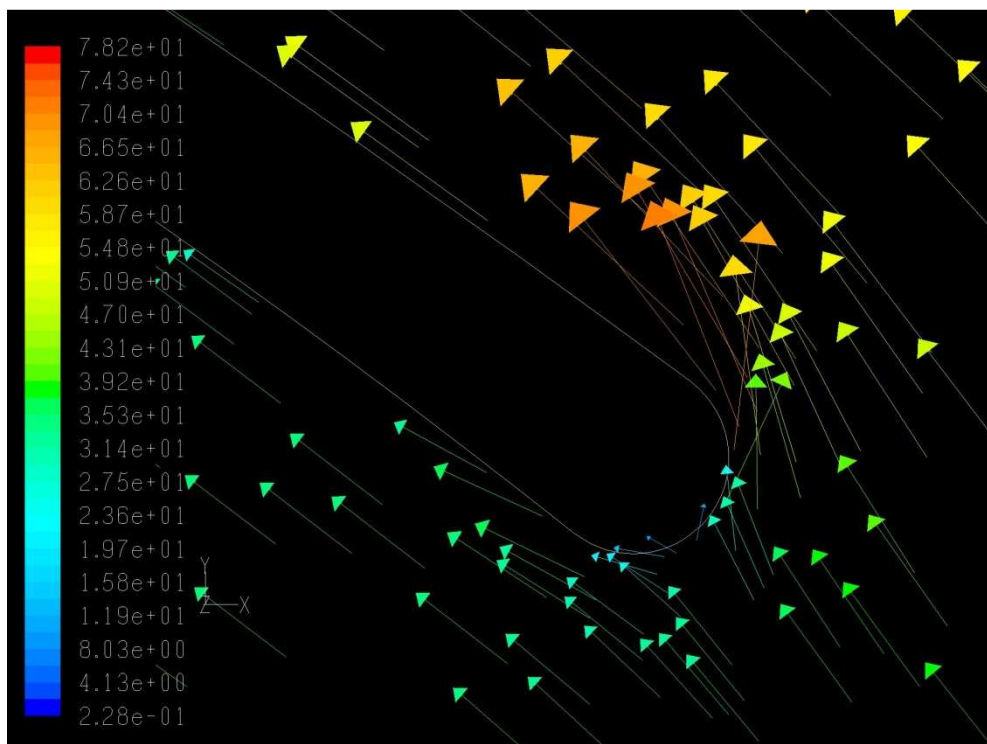
Průtok při druhém návrhovém bodě.



Obr. 5.24 Funkce difuzoru, a) Rychlostí pole v řezu difuzorem, b) pole statického tlaku v řezu difuzorem.



Obr. 5.25 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu



Obr. 5.26 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu

Pokud bychom porovnali rychlosti proudění v difuzoru při tomto průtoku $Q = 615$ l/s a při průtoku druhého návrhového bodu $Q = 415$ l/s, můžeme si všimnout, že rychlosti v kanálech se výrazně zvýšily. Tyto vysoké rychlosti mohou být jedním z důvodů velkých

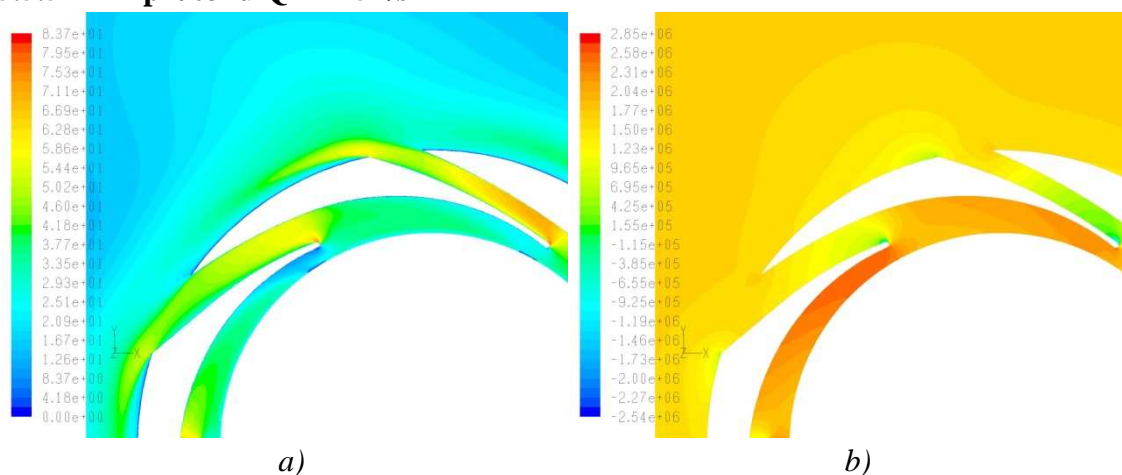
ztrát při vysokých průtocích. Pokud si napíšeme vzoreček pro výpočet ztrátové měrné energie,

$$Y = \xi \frac{v^2}{2},$$

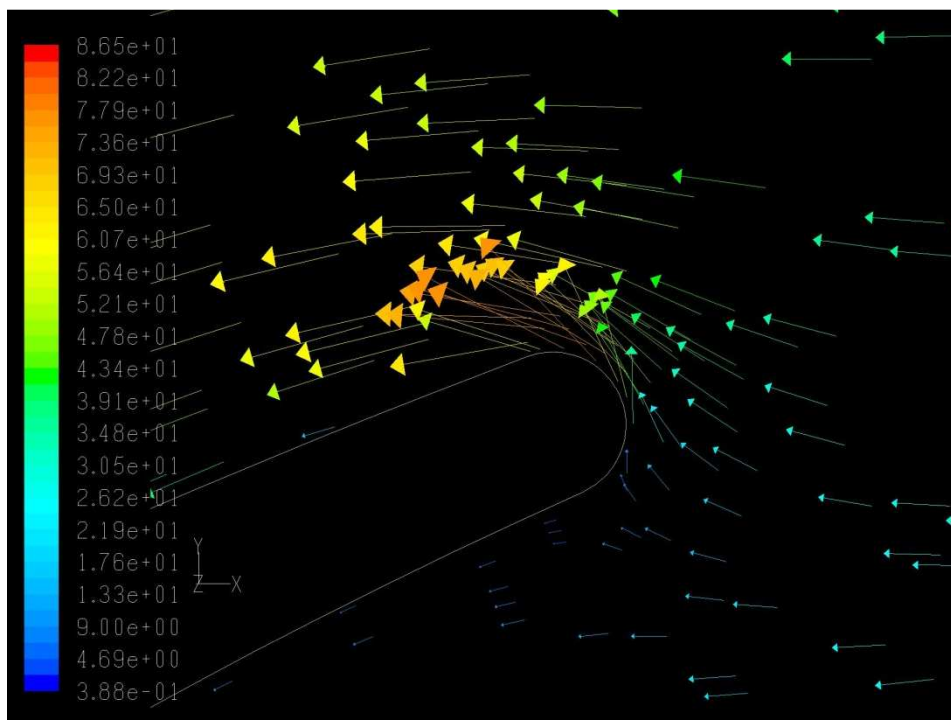
kde ξ je ztrátový součinitel (lze získat experimentálně), můžeme vidět, že ztráty velmi závisí na rychlosti proudící kapaliny. Platí, že čím větší bude rychlost, tím větší budou ztráty. V užším kanálu budou větší rychlosti a tudíž i větší ztráty.

Neobvyklé chování lze pozorovat na obrázcích 5.25 a 5.26. Přestože jde na obrázku 5.26 o vstup do kanálu pro nižší průtok, při vyšším průtoku má vstup lepší proudění, než vstup do kanálu pro vyšší průtok na obrázku 5.25. Je vidět, že v případě širokého kanálu dochází kousek za náběžnou hranou ke zpomalení kapaliny. To lze vysvětlit tak, že kanály jsou různě široké, tím pádem jimi proteče různé množství vody. Sama kapalina si určí své proudění tak, aby šla cestou nejmenšího odporu. Jinak řečeno, proudění se upraví podle toho, jaké jsou v kanálech ztráty. V kanále pro nižší průtok jsou větší ztráty a projde jimi méně kapaliny, než v kanále pro průtok vyšší, v němž jsou ztráty menší.

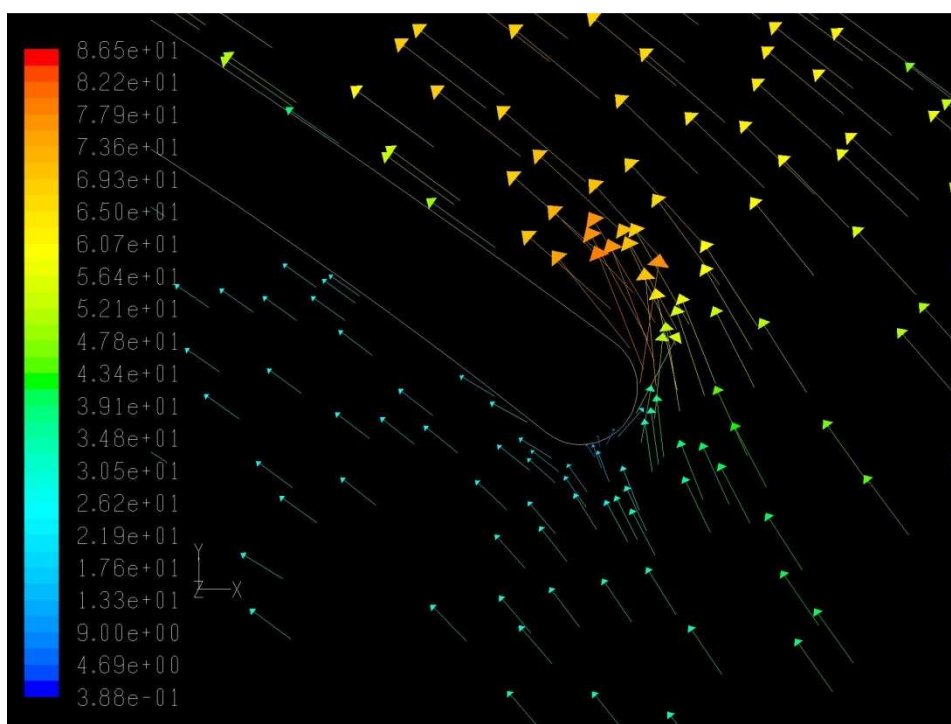
5.5.5 Při průtoku $Q = 715$ l/s



Obr. 5.27 Funkce difuzoru, a) Rychlostí pole v řezu difuzorem, b) pole statického tlaku v řezu difuzorem.



Obr. 5.28 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu



Obr. 5.29 Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu

Je vidět, že při tomto průtoku dochází v kanálech k velkým rychlostem. Kanály začínají mít problém pobrat tak velké množství kapaliny.

6 Měření difuzoru čerpadla pro dva provozní body

Návrh difuzoru pro dva pracovní body je řešením skutečného problému čerpadla přečerpávací stanice na ropu. Po výpočtovém modelování v CFD byl difuzor vyroben a odzkoušen. Zkouška byla provedena zadavateli, tedy firmou ISH & MSA čerpadla, a.s.

Výsledné charakteristiky jsou umístěny v přílohách č. 5 a 6. Příloha č. 5 je samostatná charakteristika čerpadla s difuzorem pro dva provozní body. Příloha č. 6 je porovnání nového difuzoru (s podavačkou ZK-391 a bez podavačky ZK-390) a původního 5ti-lopatkového difuzoru (MSA-134). Měření proběhlo na zkušebně při polovičních otáčkách a tudíž i při polovičních průtocích.

Z charakteristiky v příloze č. 6 je vidět, že účinnost v nízkých průtocích je přibližně stejná jako účinnost difuzoru původního. Ve vyšších průtocích je ale účinnost o několik procent vyšší. Tyto výsledky mají podobný trend jako výsledky z CFD výpočtu.

Na obrázcích 6.1 – 6.3 jsou vidět záběry pořízené během zkoušky tohoto difuzoru.



Obr. 6.1 Měřicí trať: zelené je měřené čerpadlo s difuzorem, modré je podávací čerpadlo

Při měření mohlo dojít k mírnému zkreslení výsledků vlivem nesprávného množství a umístění měřičů tlaku, a vlivem mírného zavzdušnění měřicí techniky. Na obrázku 6.2 je vidět ne moc vhodné měření tlaku. Je měřen těsně za podávacím čerpadlem zhora, pouze na jednom místě průřezu, místo na čtyřech, ze kterých by se pak provedl průměr.[5]



Obr. 6.2 Měření vstupního tlaku



Obr. 6.3 měření tlaku na výstupu

7 Závěr

Difuzor pro dva pracovní body využívá různého tvarování kanálů. Nejdříve se musejí navrhnout dva klasické difuzory, každý na jeden pracovní bod. Získáme tak dva různě tvarované kanály, které zařadíme střídavě vedle sebe. Vznikne tak kompromisní řešení, kdy se účinnostní charakteristika mírně sníží, ale pásmo vysokých účinností se roztáhne, takže překryje oba pracovní body, namísto jednoho.

Difuzor pro dva pracovní body, navrhovaný pro čerpadlo přečerpávací stanice na ropu má 6 lopatek. Pracovní body, na které je difuzor čerpadla navržen, jsou body při průtocích $Q = 615 \text{ l/s}$ a $Q = 415 \text{ l/s}$.

Byl proveden CDF výpočet proudění kapaliny s využitím programu Gambit a Ansys Fluent 6.3.26. Aby se mohly výsledky výpočtů difuzoru pro dva provozní body porovnat, bylo provedeno modelování ještě dalších tří difuzorů pro jeden pracovní bod. Jsou to dva 6ti-lopatkové, z jejichž kanálů se difuzor pro dva pracovní body skládá, a jeden 5ti-lopatkový, který je již vyroben a už se na stanici používal.

Z výsledků CFD výpočtu jsme zjistili, že rozvaděč pro dva pracovní body má vlastnosti, které jsme předpokládali. Skutečně jde o kompromisní řešení, kterým se podařilo zvednout účinnost ve vysokých průtocích o několik procent oproti původnímu stavu. Zároveň by toto řešení mělo utlumit pulzace ve vysokých průtocích, protože kanály navržené pro nízký průtok jsou velmi úzké a vibrace utlumují.

Difuzory byly navrhovány pro oběžné kolo, které bylo navrženo pouze na nízký průtok a v tom mělo také nejvyšší účinnost. Proto i modelované difuzory mají nejvyšší účinnosti spíše na straně nízkých průtoků, zatímco ve vyšších průtocích jsou účinnosti menší. To bylo ověřeno i experimentálním měřením, které provedli zadavatelé této práce, tedy firma ISH & MSA čerpadla, a.s.

Aby se vyřešil problém menších účinností ve vysokých průtocích, muselo by se kromě difuzoru navrhnout i nové oběžné kolo na pracovní bod, který by se nacházel mezi provozními body navrženého difuzoru.

Seznam použité literatury

- [1] L. Čermák, R. Hlavička: *Numerické metody*, CERM s.r.o., Brno, 2005.
- [2] J. Kadrnožka: *Lopátkové stroje*, CERM s.r.o., Brno, 2003
- [3] M. Haluza: *Tekutiny stroje I*. Brno 2011. Zápisy z přednášek. VUT, FSI.
- [4] J. Bláha, K. Brada: *Příručka čerpací techniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997.
- [5] ČSN EN ISO 9906 Hydrodynamická čerpadla - Přejímací zkoušky hydraulických výkonových parametrů
- [6] P. Rudolf: *Výpočtové modelování proudění*. Brno 2011. Zápisy z přednášek. VUT FSI

Seznam použitých symbolů a značek

Symbol	Jednotka	Název veličiny
a	[m]	šířka kanálu difuzoru
b	[m]	šířka difuzoru / oběžného kola
c	[m.s ⁻¹]	celková rychlost
c _m	[m.s ⁻¹]	meridiální složka celkové rychlosti
c _u	[m.s ⁻¹]	unášivá složka celkové rychlosti
D	[m]	průměr
g	[m.s ⁻²]	gravitační zrychlení
H	[m]	dopravní výška
l	[m]	délka
n	[s ⁻¹]	otáčky
n _s	[s ⁻¹]	specifické otáčky
p	[Pa]	tlak
p _s	[Pa]	statický tlak
p _t	[Pa]	celkový tlak
Q	[m ³ .s ⁻¹]	průtok
r	[m]	poloměr
S	[m ²]	obsah plochy
t	[s]	čas
t	[m]	rozteč
u	[m.s ⁻¹]	unášivá rychlost
v	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost
w	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost
z	[-]	počet lopatek
Y	[J.kg ⁻¹]	měrná energie
α	[°]	úhel lopatky difuzoru
β	[°]	úhel lopatky čerpadla
γ	[°]	úhel natočení výstupní hrany lopatky čerpadla
Δ	[m]	šířka lopatky čerpadla
η	[-]	účinnost
η	[m]	konformní souřadnice
η _h	[-]	hydraulická účinnost
κ	[-]	korekce podle Waisera
ξ	[-]	ztrátový součinitel
ξ	[m]	konformní souřadnice
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ	[m]	délka proudnice
φ	[°]	úhel natočení
φ	[-]	rychlostní číslo

Seznam obrázků a tabulek

Číslo	Název	Strana
Obr. 2.1	Radiálně axiální čerpadlo	17
Obr. 2.2	Kinematické poměry v oběžném kole čerpadla	18
Obr. 3.1	Proudnice	19
Obr. 3.2	Schéma difuzoru	20
Obr. 3.3	Rychlosti na vstupu do difuzoru	20
Obr. 3.4	Zobrazení pohybu částice po proudnici	22
Obr. 3.5	Tvar difuzoru s konstantní šířkou	22
Obr. 3.6	Tvar difuzoru s lineárně se měnící šířkou	23
Obr. 3.7	Tvar difuzoru s nelineárně se měnící šířkou	25
Obr. 3.8	Princip Newtonovy metody pro řešení nelineárních rovnic	27
Obr. 3.9	Proudnice	29
Obr. 3.10	Převod z polárních do konformních souřadnic	29
Obr. 3.11	Konformní zobrazení	31
Obr. 3.12	Konformní zobrazení profilu difuzoru	33
Obr. 3.13	Zobrazení kontroly difuzoru: rychlost c musí být tečná na proudnici	35
Obr. 3.14	Upravený kanál difuzoru	37
Obr. 3.15	Detail kanálu difuzoru a vyznačení jeho návrhu	37
Obr. 3.16	Detail náběžné hrany lopatky s příliš malou šířkou	38
Obr. 3.17	Ideální účinnostní charakteristika	39
Obr. 4.1	Základní rozměry difuzoru	40
Obr. 4.2	Část tabulky výpočtu difuzoru pro vysoký průtok	42
Obr. 4.3	Vykreslení proudnic do grafu	43
Obr. 4.4	Kontrola správnosti výpočtu proudnic	44
Obr. 4.5	Část tabulky výpočtu difuzoru pro nízký průtok	45
Obr. 4.6	Vykreslení proudnic do grafu	46
Obr. 4.7	Návrh kanálu v programu Autodesk Inventor	48
Obr. 4.8	Tabulka pro výpočet kontroly rozšiřování kanálu difuzoru pro nižší průtok	49
Obr. 4.9	Tabulka pro výpočet kontroly rozšiřování kanálu difuzoru pro vyšší průtok	49
Obr. 5.1	Sít' 6ti-lopátkového difuzoru pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ l/s	51
Obr. 5.1	Sít' 6ti-lopátkového difuzoru pro provozní bod při průtoku $Q = 615$ l/s	51
Obr. 5.3	Sít' kombinovaného difuzoru	52
Obr. 5.1	Sít' 5ti-lopátkového difuzoru pro provozní bod při průtoku $Q = 415$ l/s	52
Obr. 5.5	Výstup čerpadla	53
Obr. 5.6	Výstup oběžného kola přečerpávací stanice	55
Obr. 5.8	Sít' z Gambitu načtená do Fluentu	56
Obr. 5.9	Obrázky z programu Fluent 6.3.26	57
Obr. 5.10	Okrajová podmínka Velocity inlet	57
Obr. 5.11	Okrajová podmínka Pressure Outlet	58
Obr. 5.12	Vykreslení hodnoty parametru y^+	59
Obr. 5.13	Účinnostní charakteristika	61
Obr. 5.14	Účinnostní charakteristika difuzoru kombinovaného a 5ti-lopátkového	62

Obr. 5.15	Funkce difuzoru	63
Obr. 5.16	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu	63
Obr. 5.17	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu	64
Obr. 5.18	Funkce difuzoru	64
Obr. 5.19	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu	65
Obr. 5.20	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu	65
Obr. 5.21	Funkce difuzoru	66
Obr. 5.22	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu	66
Obr. 5.23	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu	67
Obr. 5.24	Funkce difuzoru	67
Obr. 5.25	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu	68
Obr. 5.26	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu	68
Obr. 5.27	Funkce difuzoru	69
Obr. 5.28	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u širokého kanálu	70
Obr. 5.29	Vektory rychlosti na náběžné hraně lopatky u úzkého kanálu	70
Obr. 6.1	Měřicí trať: zelené je měřené čerpadlo s difuzorem, modré je podávací čerpadlo	71
Obr. 6.2	Měření vstupního tlaku	72
Obr. 6.3	měření tlaku na výstupu	72

Číslo	Název	Strana
Tab. 4.1	Základní rozměry difuzoru	40
Tab. 4.2	Zadané a vypočtené hodnoty	40
Tab. 4.3	Výpočet konstant	41
Tab. 4.4	Hodnoty rychlostí c_u a c_m	44
Tab. 4.5	Hodnoty neměnných konstant	45
Tab. 4.6	Zadané a vypočtené hodnoty	45
Tab. 4.7	Hodnoty rychlostí c_u a c_m	47
Tab. 5.1	Základní rozměry čerpadla	55
Tab. 5.2	Vypočtené neměnné hodnoty	55
Tab. 5.3	Výpočet okrajových podmínek	55
Tab. 5.4	Výsledky počítačového modelování	60

Seznam příloh

Příloha č. 1	Excel výpočtu proudnice: Difuzor 6ti-lopátkový pro průtok 415 l/s
Příloha č. 2	Excel výpočtu proudnice: Difuzor 6ti-lopátkový pro průtok 615 l/s
Příloha č. 3	Excel výpočtu proudnice: Difuzor 5ti-lopátkový pro průtok 415 l/s
Příloha č. 4	Charakteristika čerpadla
Příloha č. 5	Charakteristika čerpadla s difuzorem pro dva provozní body
Příloha č. 6	Charakteristika čerpadla – porovnání
Příloha č. 7	Výkres difuzoru pro dva pracovní body
Příloha č. 8	DVD (diplomová práce ve formátu PDF, data z Gambitu, dwg soubory, data z Fluentu)

Příloha č. 1: Excel výpočtu proudnice: Difuzor 6ti-lopátkový pro průtok 415 l/s

Zadané hodnoty:	
r ₃	0,2475 m
r ₄	0,32 m
b ₂	0,05
b ₃	0,069 m
b ₄	0,12 m
H	270 m
Q	0,415 m ³ /s
η _c	0,79 -
η _h	0,86881944 -
n	49,6666667 s ⁻¹
g	9,81 m/s ²

Výpočet konstant:	
a ₁	8,78734921
b ₁	2,54104523
c ₁	-2,8726576
d ₁	0,49110353
C ₀	-1,274497
K1	9,76918556
K2	0,0660493

Kontrola:
0

R _{3x}	R _{4x}	R _{3y}	R _{4y}	φ [°]	φ [rad]	r	1. r _x	1. r _y
0,248	0,320	0,000	0,000	0	0,000	0,24750	0,2475	0,0000
0,247	0,319	0,022	0,028	5	0,087	0,24962	0,2487	0,0218
0,244	0,315	0,043	0,056	10	0,175	0,25176	0,2479	0,0437
0,239	0,309	0,064	0,083	15	0,262	0,25391	0,2453	0,0657
0,233	0,301	0,085	0,109	20	0,349	0,25608	0,2406	0,0876
0,224	0,290	0,105	0,135	25	0,436	0,25825	0,2341	0,1091
0,214	0,277	0,124	0,160	30	0,524	0,26043	0,2255	0,1302
0,203	0,262	0,142	0,184	35	0,611	0,26261	0,2151	0,1506
0,190	0,245	0,159	0,206	40	0,698	0,26479	0,2028	0,1702
0,175	0,226	0,175	0,226	45	0,785	0,26697	0,1888	0,1888
0,159	0,206	0,190	0,245	50	0,873	0,26914	0,1730	0,2062
0,142	0,184	0,203	0,262	55	0,960	0,27130	0,1556	0,2222
0,124	0,160	0,214	0,277	60	1,047	0,27345	0,1367	0,2368
0,105	0,135	0,224	0,290	65	1,134	0,27559	0,1165	0,2498
0,085	0,109	0,233	0,301	70	1,222	0,27771	0,0950	0,2610
0,064	0,083	0,239	0,309	75	1,309	0,27982	0,0724	0,2703
0,043	0,056	0,244	0,315	80	1,396	0,28191	0,0490	0,2776
0,022	0,028	0,247	0,319	85	1,484	0,28397	0,0247	0,2829
0,000	0,000	0,248	0,320	90	1,571	0,28602	0,0000	0,2860
-0,022	-0,028	0,247	0,319	95	1,658	0,28804	-0,0251	0,2869
-0,043	-0,056	0,244	0,315	100	1,745	0,29004	-0,0504	0,2856
-0,064	-0,083	0,239	0,309	105	1,833	0,29202	-0,0756	0,2821
-0,085	-0,109	0,233	0,301	110	1,920	0,29397	-0,1005	0,2762
-0,105	-0,135	0,224	0,290	115	2,007	0,29590	-0,1251	0,2682
-0,124	-0,160	0,214	0,277	120	2,094	0,29780	-0,1489	0,2579
-0,142	-0,184	0,203	0,262	125	2,182	0,29967	-0,1719	0,2455
-0,159	-0,206	0,190	0,245	130	2,269	0,30152	-0,1938	0,2310
-0,175	-0,226	0,175	0,226	135	2,356	0,30335	-0,2145	0,2145
-0,190	-0,245	0,159	0,206	140	2,443	0,30515	-0,2338	0,1961
-0,203	-0,262	0,142	0,184	145	2,531	0,30692	-0,2514	0,1760
-0,214	-0,277	0,124	0,160	150	2,618	0,30867	-0,2673	0,1543
-0,224	-0,290	0,105	0,135	155	2,705	0,31039	-0,2813	0,1312
-0,233	-0,301	0,085	0,109	160	2,793	0,31209	-0,2933	0,1067
-0,239	-0,309	0,064	0,083	165	2,880	0,31376	-0,3031	0,0812
-0,244	-0,315	0,043	0,056	170	2,967	0,31542	-0,3106	0,0548
-0,247	-0,319	0,022	0,028	175	3,054	0,31704	-0,3158	0,0276
-0,248	-0,320	0,000	0,000	180	3,142			
-0,247	-0,319	-0,022	-0,028	185	3,229			
-0,244	-0,315	-0,043	-0,056	190	3,316			
-0,239	-0,309	-0,064	-0,083	195	3,403			
-0,233	-0,301	-0,085	-0,109	200	3,491			
-0,224	-0,290	-0,105	-0,135	205	3,578			

-0,214	-0,277	-0,124	-0,160	210	3,665
-0,203	-0,262	-0,142	-0,184	215	3,752
-0,190	-0,245	-0,159	-0,206	220	3,840
-0,175	-0,226	-0,175	-0,226	225	3,927
-0,159	-0,206	-0,190	-0,245	230	4,014
-0,142	-0,184	-0,203	-0,262	235	4,102
-0,124	-0,160	-0,214	-0,277	240	4,189
-0,112	-0,145	-0,221	-0,285	243,052078	4,242
-0,105	-0,135	-0,224	-0,290	245	4,276
-0,085	-0,109	-0,233	-0,301	250	4,363
-0,064	-0,083	-0,239	-0,309	255	4,451
-0,043	-0,056	-0,244	-0,315	260	4,538
-0,022	-0,028	-0,247	-0,319	265	4,625
0,000	0,000	-0,248	-0,320	270	4,712
0,022	0,028	-0,247	-0,319	275	4,800
0,043	0,056	-0,244	-0,315	280	4,887
0,064	0,083	-0,239	-0,309	285	4,974
0,085	0,109	-0,233	-0,301	290	5,061
0,105	0,135	-0,224	-0,290	295	5,149
0,124	0,160	-0,214	-0,277	300	5,236
0,142	0,184	-0,203	-0,262	305	5,323
0,159	0,206	-0,190	-0,245	310	5,411
0,175	0,226	-0,175	-0,226	315	5,498
0,190	0,245	-0,159	-0,206	320	5,585
0,203	0,262	-0,142	-0,184	325	5,672
0,214	0,277	-0,124	-0,160	330	5,760
0,224	0,290	-0,105	-0,135	335	5,847
0,233	0,301	-0,085	-0,109	340	5,934
0,239	0,309	-0,064	-0,083	345	6,021
0,244	0,315	-0,043	-0,056	350	6,109
0,247	0,319	-0,022	-0,028	355	6,196
0,248	0,320	0,000	0,000	360	6,283

2. r _x	2. r _y	3. r _x	3. r _y	4. r _x	4. r _y	5. r _x	5. r _y	6. r _x	6. r _y
0,12375	0,21434	-0,12375	0,21434	-0,24750	0,00000	-0,12375	-0,21434	0,12375	-0,21434
0,10549	0,22623	-0,14317	0,20447	-0,24867	-0,02176	-0,10549	-0,22623	0,14317	-0,20447
0,08611	0,23658	-0,16183	0,19286	-0,24793	-0,04372	-0,08611	-0,23658	0,16183	-0,19286
0,06572	0,24526	-0,17954	0,17954	-0,24526	-0,06572	-0,06572	-0,24526	0,17954	-0,17954
0,04447	0,25219	-0,19617	0,16460	-0,24064	-0,08758	-0,04447	-0,25219	0,19617	-0,16460
0,02251	0,25727	-0,21155	0,14813	-0,23406	-0,10914	-0,02251	-0,25727	0,21155	-0,14813
0,00000	0,26043	-0,22554	0,13022	-0,22554	-0,13022	0,00000	-0,26043	0,22554	-0,13022
-0,02289	0,26161	-0,23801	0,11098	-0,21512	-0,15063	0,02289	-0,26161	0,23801	-0,11098
-0,04598	0,26077	-0,24882	0,09056	-0,20284	-0,17020	0,04598	-0,26077	0,24882	-0,09056
-0,06910	0,25787	-0,25787	0,06910	-0,18877	-0,18877	0,06910	-0,25787	0,25787	-0,06910
-0,09205	0,25291	-0,26505	0,04674	-0,17300	-0,20617	0,09205	-0,25291	0,26505	-0,04674
-0,11466	0,24588	-0,27027	0,02365	-0,15561	-0,22224	0,11466	-0,24588	0,27027	-0,02365
-0,13673	0,23682	-0,27345	0,00000	-0,13673	-0,23682	0,13673	-0,23682	0,27345	0,00000
-0,15807	0,22575	-0,27454	-0,02402	-0,11647	-0,24977	0,15807	-0,22575	0,27454	0,02402
-0,17851	0,21274	-0,27349	-0,04822	-0,09498	-0,26096	0,17851	-0,21274	0,27349	0,04822
-0,19786	0,19786	-0,27028	-0,07242	-0,07242	-0,27028	0,19786	-0,19786	0,27028	0,07242
-0,21595	0,18121	-0,26490	-0,09642	-0,04895	-0,27762	0,21595	-0,18121	0,26490	0,09642
-0,23262	0,16288	-0,25737	-0,12001	-0,02475	-0,28289	0,23262	-0,16288	0,25737	0,12001
-0,24770	0,14301	-0,24770	-0,14301	0,00000	-0,28602	0,24770	-0,14301	0,24770	0,14301
-0,26105	0,12173	-0,23595	-0,16521	0,02510	-0,28695	0,26105	-0,12173	0,23595	0,16521
-0,27255	0,09920	-0,22219	-0,18644	0,05037	-0,28564	0,27255	-0,09920	0,22219	0,18644
-0,28207	0,07558	-0,20649	-0,20649	0,07558	-0,28207	0,28207	-0,07558	0,20649	0,20649
-0,28950	0,05105	-0,18896	-0,22519	0,10054	-0,27624	0,28950	-0,05105	0,18896	0,22519

-0,29477	0,02579	-0,16972	-0,24238	0,12505	-0,26817	0,29477	-0,02579	0,16972	0,24238
-0,29780	0,00000	-0,14890	-0,25790	0,14890	-0,25790	0,29780	0,00000	0,14890	0,25790
-0,29853	-0,02612	-0,12665	-0,27160	0,17189	-0,24548	0,29853	0,02612	0,12665	0,27160
-0,29694	-0,05236	-0,10313	-0,28334	0,19382	-0,23098	0,29694	0,05236	0,10313	0,28334
-0,29301	-0,07851	-0,07851	-0,29301	0,21450	-0,21450	0,29301	0,07851	0,07851	0,29301
-0,28674	-0,10437	-0,05299	-0,30051	0,23376	-0,19614	0,28674	0,10437	0,05299	0,30051
-0,27816	-0,12971	-0,02675	-0,30575	0,25141	-0,17604	0,27816	0,12971	0,02675	0,30575
-0,26731	-0,15433	0,00000	-0,30867	0,26731	-0,15433	0,26731	0,15433	0,00000	0,30867
-0,25426	-0,17803	0,02705	-0,30921	0,28131	-0,13118	0,25426	0,17803	-0,02705	0,30921
-0,23908	-0,20061	0,05419	-0,30735	0,29327	-0,10674	0,23908	0,20061	-0,05419	0,30735
-0,22187	-0,22187	0,08121	-0,30307	0,30307	-0,08121	0,22187	0,22187	-0,08121	0,30307
-0,20274	-0,24162	0,10788	-0,29639	0,31062	-0,05477	0,20274	0,24162	-0,10788	0,29639
-0,18185	-0,25971	0,13399	-0,28734	0,31584	-0,02763	0,18185	0,25971	-0,13399	0,28734

Příloha č. 2: Excel výpočtu proudnice: Difuzor 6ti-lopatkový pro průtok 615 l/s

Zadané hodnoty:	
r ₃	0,2475 m
r ₄	0,32 m
b ₂	0,05 m
b ₃	0,069 m
b ₄	0,12 m
H	250 m
Q	0,615 m ³ /s
η _c	0,75 -
η _h	0,8460254 -
n	49,6666667 s ⁻¹
g	9,81 m/s ²

Výpočet konstant:	
a ₁	8,78734921
b ₁	2,54104523
c ₁	-2,8726576
d ₁	0,49110353
C ₀	-1,274497
K1	9,28925169
K2	0,09788029

Kontrola:
0

R _{3x}	R _{4x}	R _{3y}	R _{4y}	φ [°]	φ [rad]	r	1. r _x	1. r _y
0,248	0,320	0,000	0,000	0	0,000	0,24750	0,2475	0,0000
0,247	0,319	0,022	0,028	5	0,087	0,25080	0,2498	0,0219
0,244	0,315	0,043	0,056	10	0,175	0,25416	0,2503	0,0441
0,239	0,309	0,064	0,083	15	0,262	0,25754	0,2488	0,0667
0,233	0,301	0,085	0,109	20	0,349	0,26094	0,2452	0,0892
0,224	0,290	0,105	0,135	25	0,436	0,26434	0,2396	0,1117
0,214	0,277	0,124	0,160	30	0,524	0,26773	0,2319	0,1339
0,203	0,262	0,142	0,184	35	0,611	0,27111	0,2221	0,1555
0,190	0,245	0,159	0,206	40	0,698	0,27446	0,2102	0,1764
0,175	0,226	0,175	0,226	45	0,785	0,27778	0,1964	0,1964
0,159	0,206	0,190	0,245	50	0,873	0,28105	0,1807	0,2153
0,142	0,184	0,203	0,262	55	0,960	0,28428	0,1631	0,2329
0,124	0,160	0,214	0,277	60	1,047	0,28746	0,1437	0,2489
0,105	0,135	0,224	0,290	65	1,134	0,29058	0,1228	0,2634
0,085	0,109	0,233	0,301	70	1,222	0,29364	0,1004	0,2759
0,064	0,083	0,239	0,309	75	1,309	0,29663	0,0768	0,2865
0,043	0,056	0,244	0,315	80	1,396	0,29957	0,0520	0,2950
0,022	0,028	0,247	0,319	85	1,484	0,30245	0,0264	0,3013
0,000	0,000	0,248	0,320	90	1,571	0,30526	0,0000	0,3053
-0,022	-0,028	0,247	0,319	95	1,658	0,30801	-0,0268	0,3068
-0,043	-0,056	0,244	0,315	100	1,745	0,31070	-0,0540	0,3060
-0,064	-0,083	0,239	0,309	105	1,833	0,31333	-0,0811	0,3027
-0,085	-0,109	0,233	0,301	110	1,920	0,31590	-0,1080	0,2968
-0,105	-0,135	0,224	0,290	115	2,007	0,31842	-0,1346	0,2886
-0,124	-0,160	0,214	0,277	120	2,094	0,32087	-0,1604	0,2779
-0,142	-0,184	0,203	0,262	125	2,182			
-0,159	-0,206	0,190	0,245	130	2,269			
-0,175	-0,226	0,175	0,226	135	2,356			
-0,190	-0,245	0,159	0,206	140	2,443			
-0,203	-0,262	0,142	0,184	145	2,531			
-0,214	-0,277	0,124	0,160	150	2,618			
-0,224	-0,290	0,105	0,135	155	2,705			
-0,233	-0,301	0,085	0,109	160	2,793			
-0,239	-0,309	0,064	0,083	165	2,880			
-0,244	-0,315	0,043	0,056	170	2,967			
-0,247	-0,319	0,022	0,028	175	3,054			
-0,248	-0,320	0,000	0,000	180	3,142			
-0,247	-0,319	-0,022	-0,028	185	3,229			
-0,244	-0,315	-0,043	-0,056	190	3,316			
-0,239	-0,309	-0,064	-0,083	195	3,403			
-0,233	-0,301	-0,085	-0,109	200	3,491			
-0,224	-0,290	-0,105	-0,135	205	3,578			
-0,214	-0,277	-0,124	-0,160	210	3,665			

-0,203	-0,262	-0,142	-0,184	215	3,752
-0,190	-0,245	-0,159	-0,206	220	3,840
-0,175	-0,226	-0,175	-0,226	225	3,927
-0,159	-0,206	-0,190	-0,245	230	4,014
-0,142	-0,184	-0,203	-0,262	235	4,102
-0,124	-0,160	-0,214	-0,277	240	4,189
-0,112	-0,145	-0,221	-0,285	243,052078	4,242
-0,105	-0,135	-0,224	-0,290	245	4,276
-0,085	-0,109	-0,233	-0,301	250	4,363
-0,064	-0,083	-0,239	-0,309	255	4,451
-0,043	-0,056	-0,244	-0,315	260	4,538
-0,022	-0,028	-0,247	-0,319	265	4,625
0,000	0,000	-0,248	-0,320	270	4,712
0,022	0,028	-0,247	-0,319	275	4,800
0,043	0,056	-0,244	-0,315	280	4,887
0,064	0,083	-0,239	-0,309	285	4,974
0,085	0,109	-0,233	-0,301	290	5,061
0,105	0,135	-0,224	-0,290	295	5,149
0,124	0,160	-0,214	-0,277	300	5,236
0,142	0,184	-0,203	-0,262	305	5,323
0,159	0,206	-0,190	-0,245	310	5,411
0,175	0,226	-0,175	-0,226	315	5,498
0,190	0,245	-0,159	-0,206	320	5,585
0,203	0,262	-0,142	-0,184	325	5,672
0,214	0,277	-0,124	-0,160	330	5,760
0,224	0,290	-0,105	-0,135	335	5,847
0,233	0,301	-0,085	-0,109	340	5,934
0,239	0,309	-0,064	-0,083	345	6,021
0,244	0,315	-0,043	-0,056	350	6,109
0,247	0,319	-0,022	-0,028	355	6,196
0,248	0,320	0,000	0,000	360	6,283

2. r _x	2. r _y	3. r _x	3. r _y	4. r _x	4. r _y	5. r _x	5. r _y	6. r _x	6. r _y
0,12375	0,21434	-0,12375	0,21434	-0,24750	0,00000	-0,12375	-0,21434	0,12375	-0,21434
0,10599	0,22730	-0,14385	0,20544	-0,24984	-0,02186	-0,10599	-0,22730	0,14385	-0,20544
0,08693	0,23883	-0,16337	0,19469	-0,25029	-0,04413	-0,08693	-0,23883	0,16337	-0,19469
0,06666	0,24876	-0,18211	0,18211	-0,24876	-0,06666	-0,06666	-0,24876	0,18211	-0,18211
0,04531	0,25697	-0,19989	0,16773	-0,24520	-0,08925	-0,04531	-0,25697	0,19989	-0,16773
0,02304	0,26333	-0,21653	0,15162	-0,23957	-0,11171	-0,02304	-0,26333	0,21653	-0,15162
0,00000	0,26773	-0,23186	0,13387	-0,23186	-0,13387	0,00000	-0,26773	0,23186	-0,13387
-0,02363	0,27008	-0,24571	0,11458	-0,22208	-0,15550	0,02363	-0,27008	0,24571	-0,11458
-0,04766	0,27029	-0,25791	0,09387	-0,21025	-0,17642	0,04766	-0,27029	0,25791	-0,09387
-0,07189	0,26831	-0,26831	0,07189	-0,19642	-0,19642	0,07189	-0,26831	0,26831	-0,07189
-0,09613	0,26410	-0,27678	0,04880	-0,18066	-0,21530	0,09613	-0,26410	0,27678	-0,04880
-0,12014	0,25765	-0,28320	0,02478	-0,16306	-0,23287	0,12014	-0,25765	0,28320	-0,02478
-0,14373	0,24894	-0,28746	0,00000	-0,14373	-0,24894	0,14373	-0,24894	0,28746	0,00000
-0,16667	0,23803	-0,28947	-0,02533	-0,12280	-0,26335	0,16667	-0,23803	0,28947	-0,02533
-0,18875	0,22494	-0,28917	-0,05099	-0,10043	-0,27593	0,18875	-0,22494	0,28917	0,05099
-0,20975	0,20975	-0,28653	-0,07677	-0,07677	-0,28653	0,20975	-0,20975	0,28653	0,07677
-0,22949	0,19256	-0,28151	-0,10246	-0,05202	-0,29502	0,22949	-0,19256	0,28151	0,10246
-0,24775	0,17348	-0,27411	-0,12782	-0,02636	-0,30130	0,24775	-0,17348	0,27411	0,12782
-0,26436	0,15263	-0,26436	-0,15263	0,00000	-0,30526	0,26436	-0,15263	0,26436	0,15263
-0,27915	0,13017	-0,25231	-0,17667	0,02684	-0,30684	0,27915	-0,13017	0,25231	0,17667
-0,29196	0,10627	-0,23801	-0,19971	0,05395	-0,30598	0,29196	-0,10627	0,23801	0,19971
-0,30265	0,08110	-0,22156	-0,22156	0,08110	-0,30265	0,30265	-0,08110	0,22156	0,22156
-0,31110	0,05486	-0,20306	-0,24199	0,10804	-0,29685	0,31110	-0,05486	0,20306	0,24199
-0,31720	0,02775	-0,18264	-0,26083	0,13457	-0,28858	0,31720	-0,02775	0,18264	0,26083
-0,32087	0,00000	-0,16044	-0,27789	0,16044	-0,27789	0,32087	0,00000	0,16044	0,27789

Příloha č. 3: Excel výpočtu proudnice: Difuzor 5ti-lopatkový pro průtok 415 l/s

Zadané hodnoty:		Výpočet konstant:	
r_3	0,2475 m	a_1	8,7873492
r_4	0,32 m	b_1	2,5410452
b_3	0,069 m	c_1	-2,8726576
b_4	0,12 m	d_1	0,4911035
H	270 m	C_0	-1,274497
Q	0,415 m ³ /s	K1	10,032392
η_c	0,75 -	K2	0,0660493
η_h	0,8460254 -		
n	49,666667 s ⁻¹		
g	9,81 m/s ²	Kontrola:	0

R_{3x}	R_{4x}	R_{3y}	R_{4y}	φ [°]	φ [rad]	r	1. r_x	1. r_y
0,248	0,320	0,000	0,000	0	0,000	0,24750	0,2475	0,0000
0,247	0,319	0,022	0,028	5	0,087	0,24956	0,2486	0,0218
0,244	0,315	0,043	0,056	10	0,175	0,25165	0,2478	0,0437
0,239	0,309	0,064	0,083	15	0,262	0,25374	0,2451	0,0657
0,233	0,301	0,085	0,109	20	0,349	0,25585	0,2404	0,0875
0,224	0,290	0,105	0,135	25	0,436	0,25797	0,2338	0,1090
0,214	0,277	0,124	0,160	30	0,524	0,26009	0,2252	0,1300
0,203	0,262	0,142	0,184	35	0,611	0,26221	0,2148	0,1504
0,190	0,245	0,159	0,206	40	0,698	0,26433	0,2025	0,1699
0,175	0,226	0,175	0,226	45	0,785	0,26645	0,1884	0,1884
0,159	0,206	0,190	0,245	50	0,873	0,26857	0,1726	0,2057
0,142	0,184	0,203	0,262	55	0,960	0,27068	0,1553	0,2217
0,124	0,160	0,214	0,277	60	1,047	0,27277	0,1364	0,2362
0,105	0,135	0,224	0,290	65	1,134	0,27486	0,1162	0,2491
0,085	0,109	0,233	0,301	70	1,222	0,27693	0,0947	0,2602
0,064	0,083	0,239	0,309	75	1,309	0,27899	0,0722	0,2695
0,043	0,056	0,244	0,315	80	1,396	0,28103	0,0488	0,2768
0,022	0,028	0,247	0,319	85	1,484	0,28305	0,0247	0,2820
0,000	0,000	0,248	0,320	90	1,571	0,28505	0,0000	0,2851
-0,022	-0,028	0,247	0,319	95	1,658	0,28704	-0,0250	0,2859
-0,043	-0,056	0,244	0,315	100	1,745	0,28900	-0,0502	0,2846
-0,064	-0,083	0,239	0,309	105	1,833	0,29093	-0,0753	0,2810
-0,085	-0,109	0,233	0,301	110	1,920	0,29285	-0,1002	0,2752
-0,105	-0,135	0,224	0,290	115	2,007	0,29474	-0,1246	0,2671
-0,124	-0,160	0,214	0,277	120	2,094	0,29660	-0,1483	0,2569
-0,142	-0,184	0,203	0,262	125	2,182	0,29845	-0,1712	0,2445
-0,159	-0,206	0,190	0,245	130	2,269	0,30026	-0,1930	0,2300
-0,175	-0,226	0,175	0,226	135	2,356	0,30206	-0,2136	0,2136
-0,190	-0,245	0,159	0,206	140	2,443	0,30383	-0,2327	0,1953
-0,203	-0,262	0,142	0,184	145	2,531	0,30557	-0,2503	0,1753
-0,214	-0,277	0,124	0,160	150	2,618	0,30729	-0,2661	0,1536
-0,224	-0,290	0,105	0,135	155	2,705	0,30899	-0,2800	0,1306
-0,233	-0,301	0,085	0,109	160	2,793	0,31067	-0,2919	0,1063
-0,239	-0,309	0,064	0,083	165	2,880	0,31232	-0,3017	0,0808
-0,244	-0,315	0,043	0,056	170	2,967	0,31394	-0,3092	0,0545
-0,247	-0,319	0,022	0,028	175	3,054	0,31555	-0,3143	0,0275
-0,248	-0,320	0,000	0,000	180	3,142			
-0,247	-0,319	-0,022	-0,028	185	3,229			
-0,244	-0,315	-0,043	-0,056	190	3,316			
-0,239	-0,309	-0,064	-0,083	195	3,403			
-0,233	-0,301	-0,085	-0,109	200	3,491			
-0,224	-0,290	-0,105	-0,135	205	3,578			
-0,214	-0,277	-0,124	-0,160	210	3,665			
-0,203	-0,262	-0,142	-0,184	215	3,752			

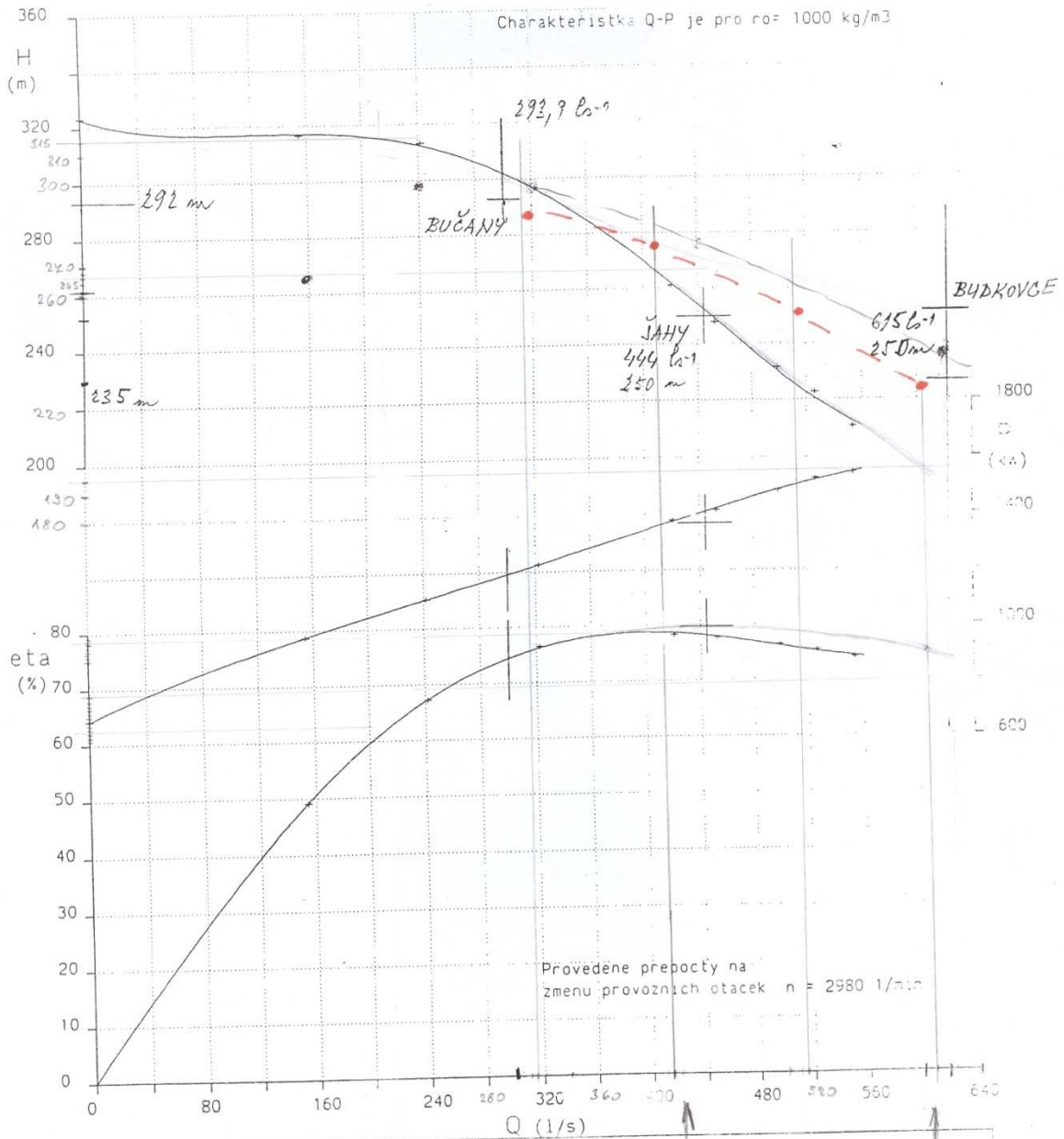
-0,190	-0,245	-0,159	-0,206	220	3,840
-0,175	-0,226	-0,175	-0,226	225	3,927
-0,159	-0,206	-0,190	-0,245	230	4,014
-0,142	-0,184	-0,203	-0,262	235	4,102
-0,124	-0,160	-0,214	-0,277	240	4,189
-0,112	-0,145	-0,221	-0,285	243,05208	4,242
-0,105	-0,135	-0,224	-0,290	245	4,276
-0,085	-0,109	-0,233	-0,301	250	4,363
-0,064	-0,083	-0,239	-0,309	255	4,451
-0,043	-0,056	-0,244	-0,315	260	4,538
-0,022	-0,028	-0,247	-0,319	265	4,625
0,000	0,000	-0,248	-0,320	270	4,712
0,022	0,028	-0,247	-0,319	275	4,800
0,043	0,056	-0,244	-0,315	280	4,887
0,064	0,083	-0,239	-0,309	285	4,974
0,085	0,109	-0,233	-0,301	290	5,061
0,105	0,135	-0,224	-0,290	295	5,149
0,124	0,160	-0,214	-0,277	300	5,236
0,142	0,184	-0,203	-0,262	305	5,323
0,159	0,206	-0,190	-0,245	310	5,411
0,175	0,226	-0,175	-0,226	315	5,498
0,190	0,245	-0,159	-0,206	320	5,585
0,203	0,262	-0,142	-0,184	325	5,672
0,214	0,277	-0,124	-0,160	330	5,760
0,224	0,290	-0,105	-0,135	335	5,847
0,233	0,301	-0,085	-0,109	340	5,934
0,239	0,309	-0,064	-0,083	345	6,021
0,244	0,315	-0,043	-0,056	350	6,109
0,247	0,319	-0,022	-0,028	355	6,196
0,248	0,320	0,000	0,000	360	6,283

2. r_x	2. r_y	3. r_x	3. r_y	4. r_x	4. r_y	5. r_x	5. r_y
0,07648	0,23539	-0,20023	0,14548	-0,20023	-0,14548	0,07648	-0,23539
0,05614	0,24316	-0,21392	0,12853	-0,18835	-0,16373	0,09751	-0,22972
0,03502	0,24920	-0,22618	0,11031	-0,17481	-0,18102	0,11814	-0,22219
0,01328	0,25340	-0,23689	0,09093	-0,15969	-0,19720	0,13820	-0,21281
-0,00893	0,25570	-0,24594	0,07052	-0,14307	-0,21211	0,15752	-0,20161
-0,03144	0,25604	-0,25323	0,04922	-0,12506	-0,22562	0,17593	-0,18867
-0,05408	0,25440	-0,25866	0,02719	-0,10579	-0,23760	0,19328	-0,17403
-0,07666	0,25075	-0,26217	0,00458	-0,08537	-0,24792	0,20941	-0,15780
-0,09902	0,24509	-0,26369	-0,01844	-0,06395	-0,25648	0,22417	-0,14008
-0,12097	0,23741	-0,26317	-0,04168	-0,04168	-0,26317	0,23741	-0,12097
-0,14232	0,22776	-0,26059	-0,06497	-0,01873	-0,26791	0,24901	-0,10061
-0,16290	0,21617	-0,25593	-0,08812	0,00472	-0,27064	0,25885	-0,07914
-0,18252	0,20271	-0,24919	-0,11095	0,02851	-0,27128	0,26681	-0,05671
-0,20102	0,18745	-0,24040	-0,13326	0,05245	-0,26981	0,27281	-0,03350
-0,21823	0,17050	-0,22959	-0,15486	0,07633	-0,26621	0,27676	-0,00966
-0,23398	0,15195	-0,21682	-0,17557	0,09998	-0,26046	0,27861	0,01460
-0,24814	0,13194	-0,20216	-0,19522	0,12320	-0,25259	0,27830	0,03911
-0,26055	0,11060	-0,18570	-0,21362	0,14578	-0,24262	0,27580	0,06367
-0,27110	0,08809	-0,16755	-0,23061	0,16755	-0,23061	0,27110	0,08809
-0,27968	0,06457	-0,14783	-0,24604	0,18831	-0,21663	0,26422	0,11215
-0,28618	0,04022	-0,12669	-0,25975	0,20789	-0,20075	0,25517	0,13568
-0,29053	0,01523	-0,10426	-0,27161	0,22610	-0,18309	0,24400	0,15845
-0,29267	-0,01022	-0,08072	-0,28150	0,24278	-0,16376	0,23077	0,18029
-0,29254	-0,03592	-0,05624	-0,28932	0,25778	-0,14289	0,21556	0,20101
-0,29012	-0,06167	-0,03100	-0,29498	0,27096	-0,12064	0,19847	0,22042

-0,28541	-0,08726	-0,00521	-0,29840	0,28219	-0,09716	0,17961	0,23835
-0,27840	-0,11248	0,02095	-0,29953	0,29134	-0,07264	0,15912	0,25464
-0,26914	-0,13713	0,04725	-0,29834	0,29834	-0,04725	0,13713	0,26914
-0,25766	-0,16100	0,07350	-0,29480	0,30309	-0,02119	0,11382	0,28170
-0,24404	-0,18390	0,09948	-0,28892	0,30553	0,00533	0,08934	0,29222
-0,22836	-0,20562	0,12499	-0,28073	0,30561	0,03212	0,06389	0,30058
-0,21073	-0,22598	0,14980	-0,27025	0,30331	0,05896	0,03766	0,30669
-0,19126	-0,24481	0,17372	-0,25755	0,29863	0,08563	0,01084	0,31048
-0,17010	-0,26193	0,19655	-0,24271	0,29157	0,11192	-0,01635	0,31189
-0,14739	-0,27720	0,21808	-0,22583	0,28217	0,13762	-0,04369	0,31089
-0,12329	-0,29046	0,23815	-0,20702	0,27048	0,16252	-0,07098	0,30746

Příloha č. 4: Charakteristika čerpadla

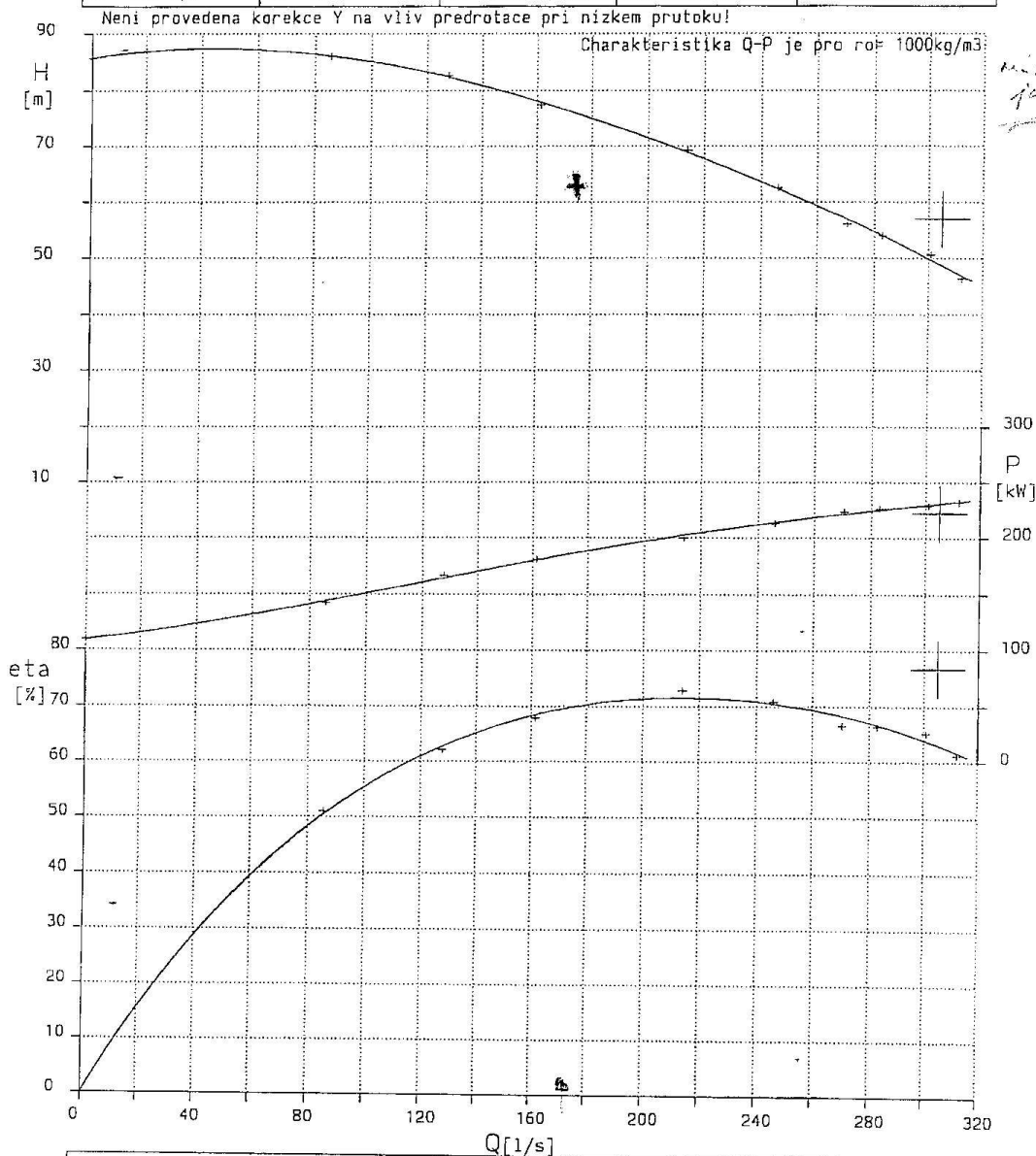
ISH&MSA a.s. OJ.	ZKUSEBNÍ DIAGRAM ČERPADLA	09-5-26 prepočty
Typ: 300-QED-460-50-DU-020-01	vyr. čís.: 09-71691.1	SZ 09 102 2010 0
Q _r = 444.4 l/s	H _r = 250 m	n _r = 2980 1/min
		etar = 79.7 %
		Pr = 1368 kW



Poznámka:			ISH&MSA ČERPADLA	
Hrdla	sání	vytlak	Typ motoru: CAF355S4	
DN	400	300	P _{jm} = 250 kW	
PN	10	10	n _{jm} = 1480 1/min	
Meril	Jasek	Centr:	<i>[Signature]</i>	Datum: 04-11-2009

Příloha č. 5: Charakteristika čerpadla s difuzorem pro dva provozní body

ISH&MSA a. s. O. l.		ZKUSEBNÍ DIAGRAM ČERPADLA		ZK-391.dat HD
Typ: 300-QED-		vyr. čís.:		SZ:
Qr= 305 l/s	Hr= 57 m	nr= 1490 1/min	etar= 76.8 %	Pr= 222.2 kW



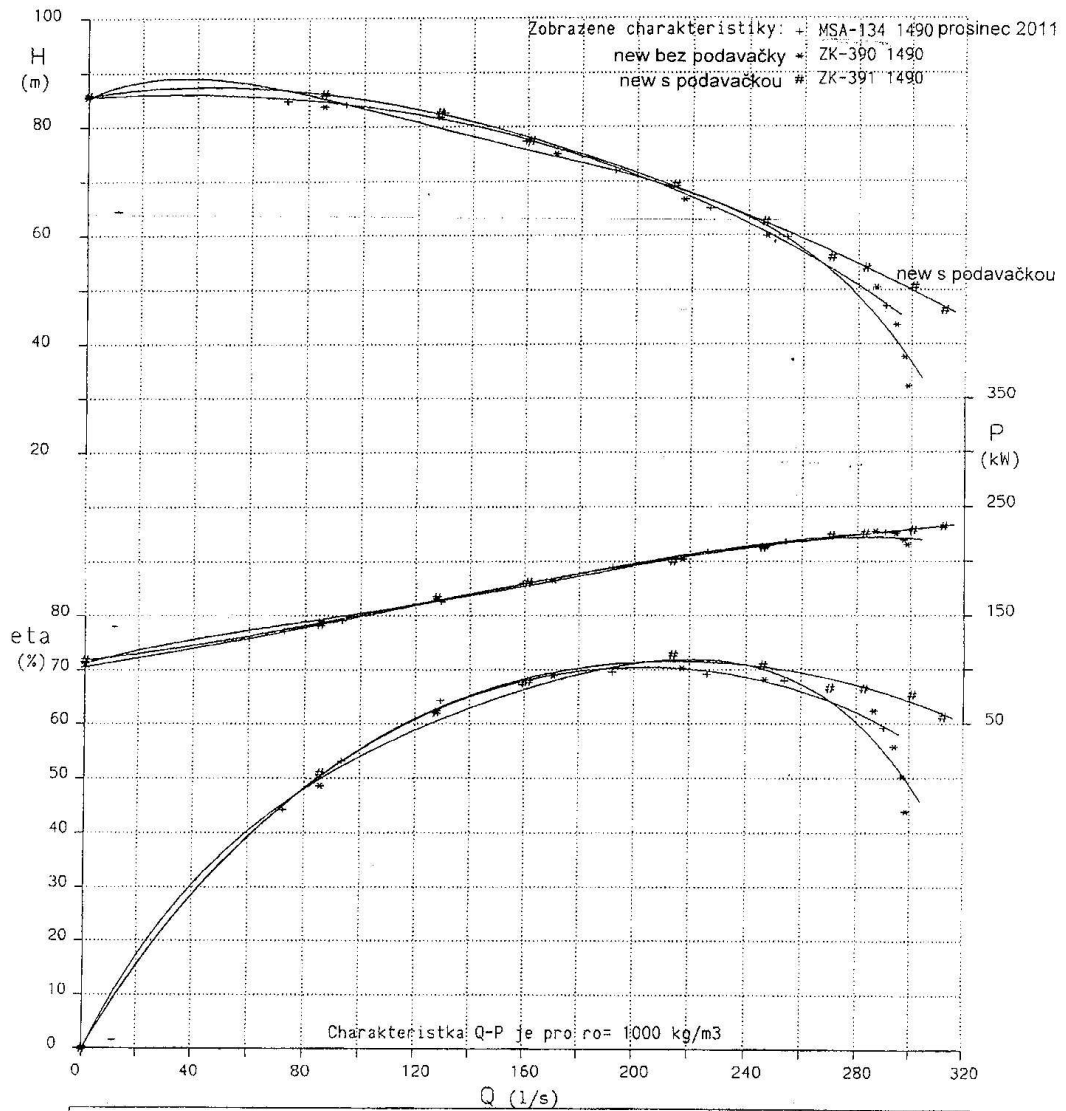
Poznámka: **ZK. Spodovecím čerpadlem**

Hrdla	sani	vytlak	Typ motoru: GAF355S4
DN	400	300	P _{jm} = 250 kW
PN	1.6	1.6	n _{jm} = 1486 1/min
Merří: J+V	Kontr.:		Datum: 02-04-2012
			ZSQ 52

Příloha č. 6: Charakteristika čerpadla – porovnání

ISH&MSA a.s. 01.		ZKUSEBNÍ DIAGRAM ČERPADLA			vyberovy
Typ:		vyr. cis.:		SZ:	
Qr=	Hr=	nr=	etar=	Pr=	

Stavy: 5 - k. l. p. n. o. p. r.



Poznámka:			
Hrdla	sani	vytlak	Typ motoru:
DN			Pjm =
PN			njm =
Meril:	Kontr.:	Datum:	PC