



Středoškolská technika 2010

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

PROUDĚNÍ V LOPATKOVÝCH MŘÍŽÍCH

Vladimír Balhárek

Střední průmyslová škola strojnická, Olomouc

tř. 17. listopadu 49

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jen uvedené prameny a literaturu.

Datum: 26. května 2010



Podpis

Děkuji Ing. Vladimíru Houšťovi, za poskytnutí informací a konzultací, řešené problematiky proudění zabývající se v tomto projektu. Také bych chtěl poděkovat Petrovi Lstiburkovi za školení v programu SolidWorks s nábavbou Flow Simulation, které jsem absolvoval v rámci tohoto projektu.

Obsah

Obsah	3
1 Úvod.....	4
2 O čem pojednává aerodynamika a mechanika letu	5
3 Základní pojmy z proudění	6
4 Vznik vztlaku a odporu při obtékání profilu	12
5 Součinitelé aerodynamických sil.....	14
6 Stanovení rozměrů zařízení	16
6.1 Výpočet profilu	17
7 Základní porovnání profilů.....	19
8 Proudění v mříži, princip funkce.....	28
9 Vodní energie a její zdroje	32
10 Využití zařízení.....	33
10.1 Využití získané energie	33
10.2 Stanovení výkonu	34
11 Údržba zařízení	35
11 Závěr.....	36
Anotace	37
Resumé	38
Seznam použitých zdrojů.....	39
Cizojazyčný slovník.....	41
Přílohy.....	42

1 Úvod

Cílem této práce je seznámení s problematikou proudění těles v kapalinách. Především jsem se zaměřil na profily lopatek a jejich vlastnosti. Jednotlivé kapitoly obsahují nejprve základní pojmy, jejich vysvětlení, definici jevu proudění, popisy a obrázky. Následující kapitoly obsahují výpočty, grafy a schémata pro porovnání a vysvětlení, proč zrovna tento tvar má neoptimálnější obtékání. K těmto výpočtům nám slouží specializované programy, díky nimž můžeme tyto jevy nasimulovat a dále s nimi pracovat. Některé informace v práci jsou přejaté z technické literatury, především jde o literaturu, které se zabývají aerodynamikou a mechanikou letu. Úkolem této publikace je přiblížit problematiku proudění tak, aby bylo jasné, čím je daný projekt výjimečný a také nastínit řešení problému tak, aby tomuto řešení problému bylo porozuměno. Součástí této publikace je vlastní návrh lopatky a lopatkového mechanismu.

2 O čem pojednává aerodynamika a mechanika letu

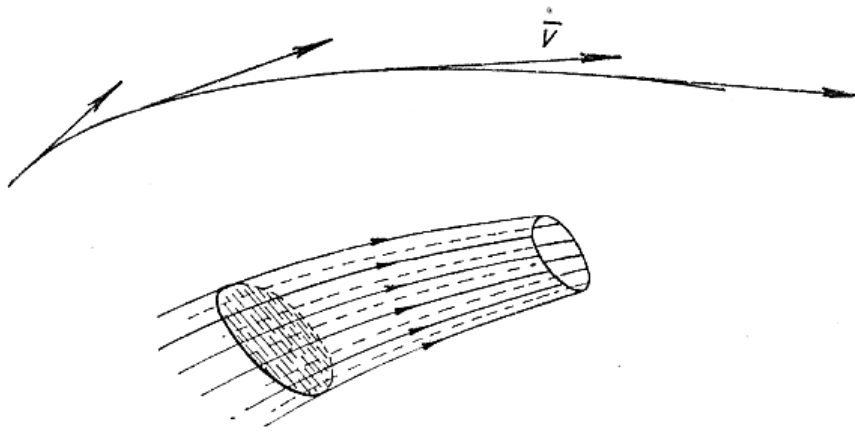
Aerodynamika je nauka zkoumající působení ovzduší na pohybující se tělesa. Umožňuje pochopit vznik sil působících na křídlo a osvětlit princip letu. Aerodynamika je dnes rozsáhlý vědní obor, který umožňuje definovat podmínky letu u jednotlivých modelů. Využijeme-li zákonů aerodynamiky jako nástroje pro definování sil, které za letu na letadlo působí, můžeme se zabývat mechanikou letu.

Mechanika letu definuje výsledky vlivu aerodynamických sil, které vznikají na různých částech letadla. Jejím prostřednictvím lze posuzovat výkony letadla, jeho letové vlastnosti a chování za různých podmínek. Tyto výkony jsou odlišné u každého typu dnešních motorových letadel i kluzáků a jsou rozdílné i u závěsných kluzáků řízených změnou polohy pilota a vyznačujících se navíc ještě potahem křídla.

3 Základní pojmy z proudění

Všechny vztahy, jichž se používá v aerodynamice, jsou založeny na základní rovnici Newtonově (síla = hmota \times zrychlení) a na rovnici spojitosti neboli kontinuity. Prostředí, v němž se tělesa pohybují nebo které se pohybuje vzhledem k tělesům, nazýváme tekutinou, jež se vyznačuje snadnou posunutelností (posuvem) částic. Tekutinu přisuzujeme podle povahy sledovaného jevu a požadovaného stupně přesnosti jisté ideální vlastnosti, popřípadě nedbáme některých vlastností skutečné tekutiny [vazkosti (viskosity), stlačitelnosti apod.]. V oboru proudění je nutno pokudmožno poměry zjednodušovat, neboť pohyb částic tekutiny je ve skutečnosti značně složitý a pro matematické řešení mnohdy nepřístupný. Dokonalou tekutinou rozumíme zidealizovanou tekutinu bez vnitřního tření (bez viskosity). Přisuzujeme-li této tekutině vnitřní tření, označujeme ji jako vazkou tekutinu. Tekutina může být dále nestlačitelná (kapalina) nebo stlačitelná (vzdušina). Většina základních úvah z oboru aerodynamiky se vztahuje na proudění dokonale nestlačitelné tekutiny, které představuje největší zjednodušení. Teorie tohoto oboru je nejstarší a také nejúplnější, avšak mnohdy se značně liší od skutečnosti. S teorií proudění, tvořící hlavní náplň teoretické aerodynamiky, souvisí experimentální aerodynamika, která se z původní pomocné vědy vyvinula v rozsáhlý vědní obor s vlastní experimentální technikou i teorií. Experimentální aerodynamika umožňuje další vývoj teorie a poskytuje pro praxi potřebný materiál.

Hlavním cílem při studiu pohybu tekutiny je zjistit síly působící na obtékaná tělesa a podmínky jejich vzniku. Znalost těchto sil je nutná pro stavbu letadel (dimenzování, určení výkonu apod.) a vlastní létání (řízení, stabilitu apod.). Poněvadž podle pohybových rovnic závisí síly za daných podmínek na pohybu částic tekutiny a ten je charakterizován průběhem rychlosti (změna její velikosti a směru s místem a časem), sleduje aerodynamika především rychlostní poměry v proudu. Ty určuje rychlostní pole, které definujeme jako prostor, v němž každému bodu přísluší v určitém okamžiku vektor rychlosti V , znázorněný úsečkou určité velikosti, směru a smyslu. Čáry, k nimž jsou vektory rychlosti v každém okamžiku tečné, jsou proudnice.



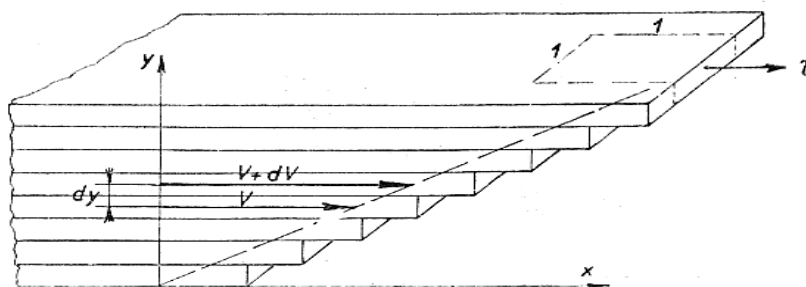
Obrázek 1 - Proudnicie a proudová trubice

Představíme-li si v určitém místě proudu malou plochu kolmou na směr proudění, vytvoří proudnicie na obvodu plošky plášť trubice, jejíž důležitou vlastností je, že tekutina může proudit pouze vnitřkem trubice. (Pláštěm trubice nemůže proudit žádná tekutina, poněvadž plášť je tvořen čarami, k nimž je vektor rychlosti vždy tečný). Tuto trubici nazýváme proudovou trubicí a její obsah proudovým vláknem. U dostatečně tenké trubice můžeme předpokládat, že v celém jejím průřezu je rychlost konstantní.

Jestliže proudění je tak utvářeno, že jeho proudový obraz je stejný v rovinách navzájem rovnoběžných, stačí je sledovat pouze v jedné rovině. Jde tedy o proudění rovinné neboli dvourozměrné na rozdíl od obecného proudění prostorového neboli třírozměrného. Nejjednodušším prouděním je pak proudění jednorozměrné, probíhající vytčenou drahou.

Vazká (viskosní) tekutina

Plyny i kapaliny kladou proti vzájemnému posouvání částic odpor, jemuž říkáme vnitřní tření neboli vazkost (viskozita). Vyjadřujeme jej tečným napětím, jež je úměrné přírůstku rychlosti mezi dvěma vrstvami.

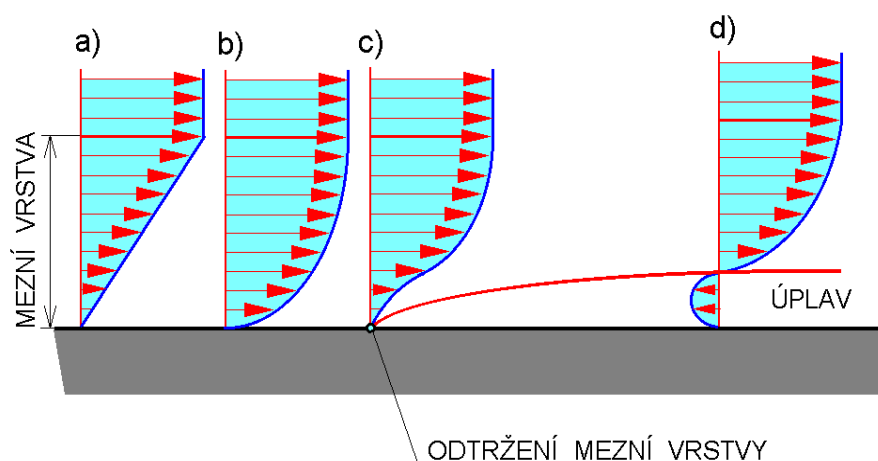


Obrázek 2 - Tečné napětí mezi vrstvami vazké (viskosní) tekutiny

$$\tau_{kg}/m^2 = \mu_{kgs}/m^2 \cdot \frac{v}{dy_m}$$

V pohybových rovnicích pro vazkou tekutinu se vyskytuje podíl ze součinitele vazkosti μ a měrné hmoty tekutiny ρ , který označujeme a jmenujeme součinitelem kinematické vazkosti. Jeho fyzikální rozměr (m^2/s) obsahuje jen kinematické jednotky, odtud jeho název.

Obtékání těles tekutinou nastává při jejich vzájemném pohybu, kdy v důsledku vazkosti tekutiny je rychlost jejího proudění směrem k povrchu zpomalování a vzniká odpor proti obtékání tělesa. Rychlost proudění tekutiny je směrem k povrchu tělesa zpomalována. Vrstva, ve které dochází ke zpomalování tekutiny, se nazývá mezní vrstva. V určitém místě tělesa dojde k odtržení proudu tekutiny od povrchu neboli odtržení mezní vrstvy od obtékaného profilu. Následně dojde k zpětnému proudění a víření tekutiny a prostor vířící tekutiny se nazývá úplav.



Obrázek 3 - Mezní vrstva

Reynoldovo číslo

Měřítkem pro posouzení vlivu vazkosti při obtékání nebo protékání těles je Reynoldovo (Reynoldsovo číslo), které vyjadřuje v podstatě poměr rozhodujících sil působících na částice tekutiny, to je sil setrvačných a třecích. Setrvačné síly jsou umírněné součinu ze hmoty částice a jejího zrychlení. Hmoty je úměrná součinu z měrné hmoty a třetí mocniny délkového rozměru (ρl^3); zrychlení je úměrné podílu rychlosti a času (doby). Vyjádříme-li při tomto čase jako podíl délky a rychlosti ($\frac{l}{v}$), je zrychlení úměrné výrazu ($\frac{v^2}{l}$). Celkem jsou tedy setrvačné síly úměrné součinu.

$$\rho l^3 \cdot \frac{v^2}{l} = \rho l^2 \cdot v^2$$

Třecí síly jsou dány součinitelem z tečného napětí τ a plochy. Jsou tedy úměrné součiniteli vazkosti μ , podílu rychlosti a délky $\left(\frac{v}{l}\right)$ a ploše l^2 , tedy celkem úměrné výrazu

$$\mu \cdot v \cdot l$$

Poměru obou sil je pak úměrný výrazu

$$\frac{\rho l^2 \cdot v^2}{\mu \cdot v \cdot l}$$

Což je bezrozměrné číslo

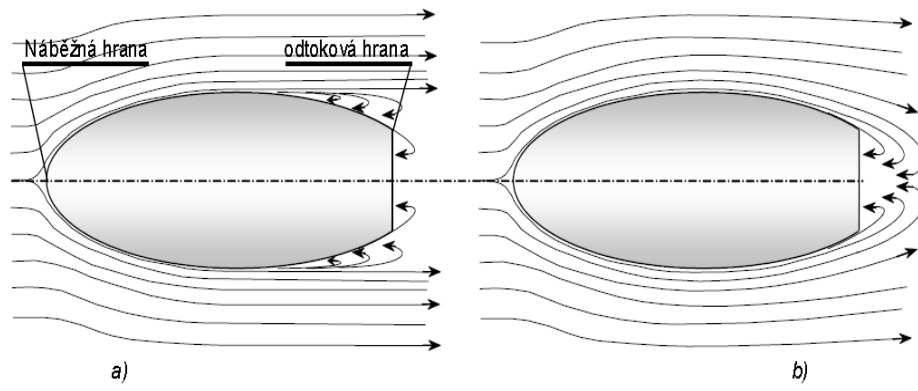
$$R = \frac{v \cdot l}{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

Podle tohoto vztahu je Reynoldovo číslo dáno součinitelem z rychlosti proudění v , charakteristického délkového rozměru tělesa l a převrátne hodnoty kinematické vazkosti. Za rychlost dosazujeme relativní rychlost obtékaného tělesa vzhledem k tekutině v nekonečnu (např. rychlost letadla) nebo střední rychlost v daném průřezu (při průtoku tekutiny potrubím). Charakteristickým délkovým rozměrem na příklad u letadla je střední hloubka křídla, u potrubí jeho průměr nebo poloměr apod. Při vyčíslení hodnoty Reynoldova čísla je třeba výslovně vždy uvést, která charakteristická délka je myšlena. Z povahy Reynoldova čísla vyplývá:

- a) Čím je Reynoldovo číslo větší, tím větší je vliv setrvačných sil a menší je vliv vazkosti. Při velkých Reynoldových čísel má tedy obtékání v hlavních rysech podobný ráz jako u tekutin bez vnitřního tření.
- b) Se zmenšujícím se Reynoldovým číslem nabývají významu síly vzniklé vlivem vazkosti a při malých hodnotách převládají nad silami setrvačnými. Síly působící na těleso jsou v tomto případě úměrné první mocnině rychlosti ($\mu \cdot v \cdot l$).
- c) Jisté hodnoty Reynoldova čísla určují rozmezí, při kterém se charakteristickým způsobem začne projevovat vzájemný vliv třecích a setrvačných sil v tekutině na celou strukturu proudění.
- d) Reynoldovo číslo je důležitým parametrem mechanické podobnosti. Obtékání dvou geometricky podobných těles (útvary) bude stejné, bude-li v obou případech zachován týž poměr mezi setrvačnými a třecími silami, působícími na částice tekutiny, čili bude-li se jednat o totéž Reynoldovo číslo.

Dva charakteristické druhy obtékání

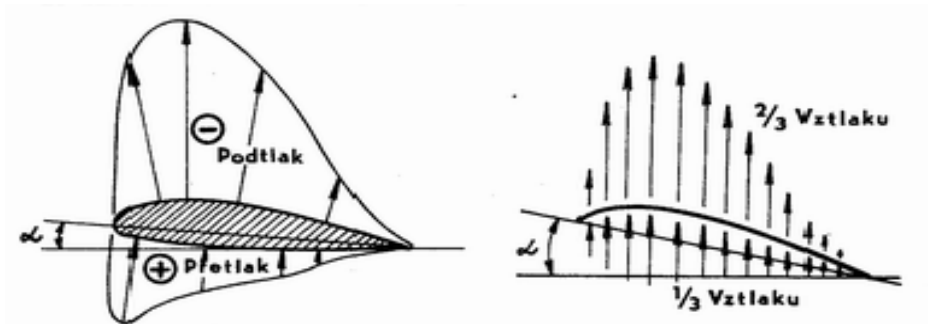
Je třeba rozlišovat dva charakteristické druhy obtékání, závislé na geometrickém tvaru obtékaných těles. V prvním případě proudící tekutinové kontinuum dokonale obtéká povrch tělesa a kopíruje jeho geometrický tvar až po jednoznačně definovanou odtokovou hranu, na které dochází k odtržení proudu od povrchu tělesa. Tvarový koeficient (c_x) se uvažuje konstantní v celém rozsahu rychlostí. V druhém případě, u tělesa se zakřiveným povrchem, dochází k odtržení proudu již na zakřiveném obtékaném povrchu a místo odtržení proudu je závislé na charakteru proudění v mezní vrstvě obtékajícího kontinua. Místo odtržení proudu je tak závislé na rychlosti obtékání a tvarový koeficient je závislý na Reynoldově čísle (Re). Při změně charakteru proudění v mezní vrstvě (z laminárního na turbulentní) mohou vznikat skokové změny místa odtržení proudu, které se potom projeví skokovými změnami hodnoty tvarového koeficientu. Od náběžné hrany po místo odtržení proudu je odpor obtékání určen jen odporem tření mezi tekutinou a obtékaným povrchem. Za místem odtržení vznikají turbulentní víry a ve zředěné tekutině za místem odtržení vzniká podtlak, který radikálně zvyšuje aerodynamický odpor tělesa. Různá místa odtržení proudu tekutiny na zakřiveném povrchu tělesa jsou ukázána na obrázku 4. Na obrázku je naznačeno těleso obtékané ustáleným laminárním prouděním kontinua. Pokud je i v mezní vrstvě tekutiny na povrchu tělesa charakter proudění laminární, dochází k odtržení proudu na největším meridiánovém průřezu tělesa, jak je znázorněno na obrázku (a, vlevo). S rostoucí rychlostí proudění kontinua roste odporová síla kvadraticky. Při určité kritické rychlosti se charakter proudění v mezní vrstvě změní z laminárního na turbulentní, tloušťka mezní vrstvy se zvětší, její přilnavost k povrchu tělesa se zvětší a místo odtržení se přesune ve směru třetí rychlosti blíže k odtokové hraně, jak je naznačeno na obrázku (b, vpravo). Plocha za místem odtržení, na kterou působí podtlak, se zmenší. Mezi laminárním a rozvinutým turbulentním prouděním v mezní vrstvě na povrchu tělesa může existovat přechodová oblast s neúplnou turbulencí. Pokud přechodová oblast nerozvinuté turbulence neexistuje, změní se na charakter proudění v mezní vrstvě skokem při jedné kritické rychlosti, a tím se změní i charakter obtékání naznačen na obrázku. Ke skokovým změnám hodnoty tvarového koeficientu (c_x) v závislosti na (Re).



Obrázek 4 - Obtékání těles na zakřiveném povrchu

4 Vznik vztlaku a odporu při obtékání profilu

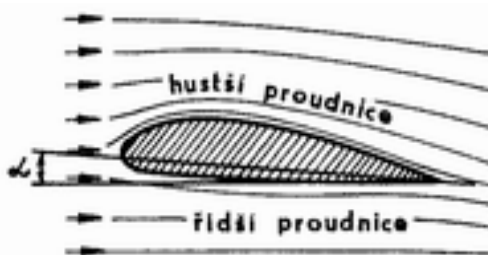
Při proudění tekutiny kolem profilu vniká nad horním povrchem, vlivem zrychleného proudění podtlak, který přisává křídlo směrem vzhůru. Pod spodním povrchem křídla dochází ke zpomalení a vzniká zde přetlak, který zespondu křídlo nadnáší. Oba tyto vlivy společně vytvářejí vztlak profilu. Přisávání horního povrchu profilu představuje při větších úhlech náběhu zhruba dvě třetiny celkového vztlaku.



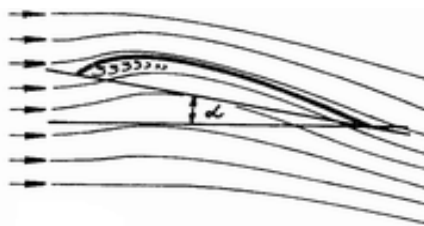
Znázornění podílu vztlaku na spodním a vrchním povrchu křídla, úhly náběhu

Obrázek 5 - Rozložení přetlaku a podtlaku kolem profilu křídla

S měnícím se úhlem náběhu profilu křídla se mění i hodnoty vztlaku Y a odporu X . Méně zakřivené profily jsou při malých hodnotách úhlu náběhu plynule obtékány, a proto vykazují i velmi malé hodnoty odporu (obrázek 6). Tenké a značně zakřivené profily, jako například profily kluzáků, jsou plynule obtékány při středních a vyšších úhlech náběhu.

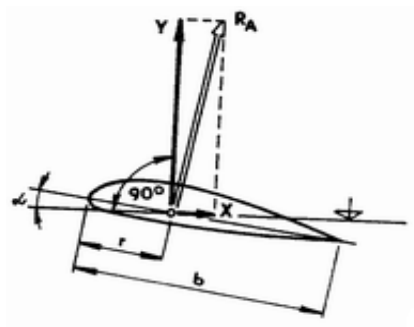


Obrázek 6 - Obtékání profilu křídla při malých úhlech náběhu; α - úhel náběhu



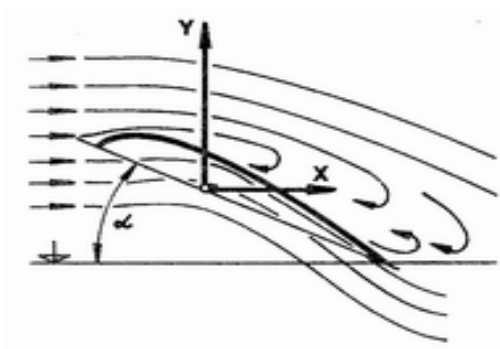
Obrázek 7 - Obtékání tenkého zakřiveného profilu křídla; α - úhel náběhu

Při malých úhlech náběhu se za náběžnou hranou na spodní straně křídla vytváří víření, které zvyšuje odpor profilu (obrázek 7). Při velkých hodnotách vzlaku a úhlu náběhu dochází u obou druhů profilu k poruše plynulého obtékání horního povrchu křídla. Nastane odtržení proudnic od povrchu a vzniká víření. Podstatně poklesne vzlak, narůstá odpor křídla (obrázek 9) a mění se jeho klopivý moment.



Y – vzlak, R_A – výsledná aerodynamická síla, X – odpor křídla, α – úhel náběhu, r – vzdálenost působíště výsledné aerodynamické síly, b – hloubka profilu křídla.

Obrázek 8 - Znáornění poměru vzlaku a odporu při plynulém obtékání profilu



Dochází k odtrhávání proudnic nad horním povrchem křídla; Y – vzlak, X – odpor, α – úhel náběh.

Obrázek 9 - Znáornění poměru vzlaku a odporu při velkém úhlu náběhu

5 Součinitelé aerodynamických sil

Aerodynamické síly působící na těleso (profil křídla) jsou dány kolmými tlaky a tečným účinkem tekutiny na povrch tělesa. Tyto síly dávají výslednici (výslednou aerodynamickou sílu) určenou směrem, smyslem, velikostí a působištěm. Rozkládáme ji do tří směrů na sebe kolmých, a to do směru proudu (rozumíme směr narušeného proudu ve velké vzdálenosti před tělesem), do kolmice k tomuto směru ležící v určité definované rovině (u profilu křídla je to rovina souměrnosti) a do kolmice k oběma směrům předešlým. Za jinak stejných okolností závisí velikosti a poloha aerodynamické síly na poloze tělesa vzhledem k proudu, kterou u profilu křídla určujeme úhlem náběhu α a úhlem vybočení β (obrázek). Složka ve směru proudu je odpor (F_x), kolmo k proudu a v rovině souměrnosti vztlak (F_y). Dále budeme předpokládat rovinné nebo souměrné obtékání (výsledné síly působící v rovině proudu, u profilu křídla v rovině souměrnosti). Aerodynamická síla je zde určena dvěma složkami: odporem (F_x) a vztlakem (F_y). Vyjadřujeme ji ve vzorcích:

$$F_x = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v^2 \quad F_y = c_y \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v^2$$

Kde c_x je součinitel odporu, c_y součinitel vztlaku. Polohu výsledné aerodynamické síly F vztahujeme k nějakému základnímu zvolenému bodu tělesa, jemuž je např. průsečík náběžné hrany s rovinou souměrnosti křídla, aerodynamický střed (neutrální bod) apod. Vyjadřujeme ji buď přímou vzdáleností působiště (e) na určité přímce od jejího zvoleného bodu, nebo nepřímou velikostí momentu síly k takovému bodu podle vztahu.

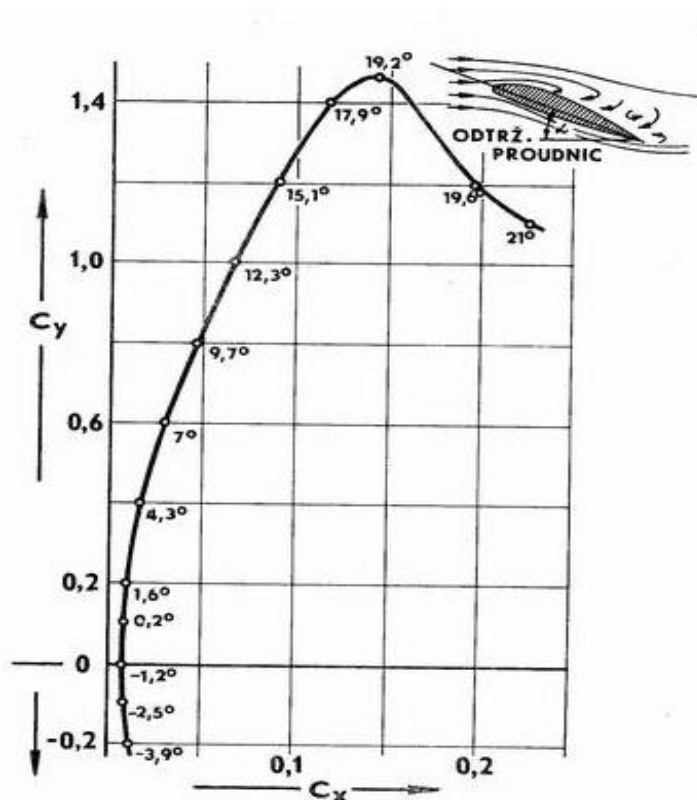
$$M = c_m \cdot \frac{\rho}{2} \cdot l \cdot S \cdot v^2$$

Součinitel c_m nazýváme momentovým součinitelem. Podle toho, k jakému bodu je moment vztažen, rozlišujeme momentové součinitele příslušnými indexy. Na příklad $c_{m_{as}}$ značí, že moment je vztažen k aerodynamickému středu. Moment M nebo součinitel c_m označujeme zde jako kladný, působí-li proti kladnému smyslu úhlu náběhu.

Ve vzorcích značí ρ měrnou hmotu proudícího prostředí (tekutiny), S – charakteristickou plochu (u křídla nosnou plochu, jinak obvykle čelní plochu tělesa), l – charakteristickou délku (u profilů největší nebo střední hloubku), v – rychlost proudící tekutiny.

Vynášíme-li součinitele c_x , c_y , c_m v závislosti na úhlu náběhu α , dostaneme tři křivky: $c_x = f_1(\alpha)$, $c_y = f_2(\alpha)$, $c_m = f_3(\alpha)$. Používá se též názornějšího zobrazení, při němž veličiny c_x , c_y , α jsou sestaveny do společného diagramu zvaného polára.

Je to čára $c_y = f(c_x)$, k jejímž jednotlivým bodům připisujeme hodnoty úhlu náběhu α . Do poláry se zakresluje ještě momentová čára $c_m = f(c_y)$, určující závislost momentového součinitele c_m na součiniteli vztlaku c_y . Kdyby byla měřítka c_x a c_y stejná, byl by součinitel výsledné aerodynamické síly $c = \sqrt{c_x^2 + c_y^2}$ dán co do velikosti i směru průvodičem příslušného bodu poláry. Poněvadž hodnoty součinitele odporu jsou proti součiniteli vztlaku u profilu poměrně malé, vynášíme v poláře obvykle c_x v měřítku pětkrát větším, v některých případech i stokrát větším než c_y . Podle toho, zda jde o profil nebo celou součást, mluvíme o charakteristikách poláře profilu, poláře křídla apod. Jelikož profil při každém úhlu náběhu má určitý odpor, nemůže polára nikdy procházet pólem (průsečík os). Horní část poláry ukazuje, že vztlak se zvětšováním úhlu náběhu roste, ale jen do určitého úhlu. Při dalším zvětšování úhlu náběhu dochází k odtržení proudnic na horní části profilu. Hodnota vztlaku klesá a narůstá hodnota odporu.

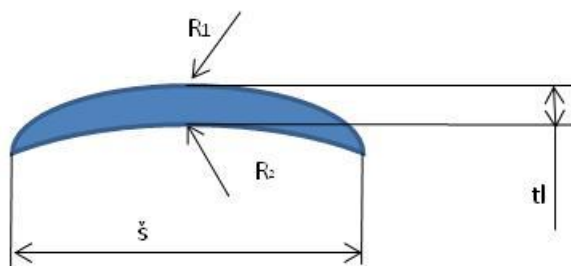


c_x – součinitel odporu, c_y – součinitel vztlaku

Obrázek 10 - Polára profilu

6 Stanovení rozměrů zařízení

Při základním výpočtu byly stanoveny rozměry. Rozměry koryta byly voleny jen podle obecných údajů. Protékaná tekutina je voda, u níž nepředpokládáme žádné předešlé víření, vlivem průtoku koryta anebo průtokem předešlého zařízení. K výpočtu je důležité stanovit rychlost protékané tekutiny, tento průtok musí být konstantní, aby byl zaručen co nejvyšší výkon zařízení. Dále byly stanoveny rozměry lopatek. Tyto rozměry byly voleny podle stavebnicového rozměru tak, aby při montáži s nimi byla co nejjednodušší manipulace. Musel být také brán ohled na technologické zpracování a druhy použitých materiálů. Lopatka má jednoduchý tvar duté polokoule obtékané po směru proudu, je osově souměrná. Její úhel náběhu pro zvýšení vztlaku je záporný, a tím dosahuje větší síly působící na lopatku vlivem obtékané tekutiny. Uvažuje se, že lopatka je tuhá a dochází u ní k minimálnímu průhybu, který je zanedbatelný.



Obrázek 11 - Profil lopatky

Vzdálenosti mezi lopatkami jsou uzpůsobeny tak, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování a víření proudu tekutiny. Lopatky musejí být uloženy tak, aby docházelo k co možná nejideálnějšímu obtoku a k nejvyššímu využití energie tekutiny.

Rozměry mechanismu:

Výška hladiny: H (m)	4	Šířka mezi koly: $L_2; L_4$ (m)	2,25
Šířka koryta: b (m)	5	Průměry kol: R_n (m)	0,5
Výška kola od hladiny: x_H (m)	1	Vzdálenost mezi lopatkami: Δx (m)	0,25
Výška mezi koly: $L_1; L_3$ (m)	4,50	Vzdálenost kola od dna: H_1 (m)	0,5

Tabulka 1 - Základní rozměry mechanismu

Při výpočtu jsem vycházel ze základních vzorců pro výpočet aerodynamické síly:

Výpočet odporu profilu F_x (N):

$$F_x = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v^2 \Rightarrow F_x = 0,4 \cdot \frac{998,0}{2} \cdot 0,02795 \cdot 1^2 = 5,578N$$

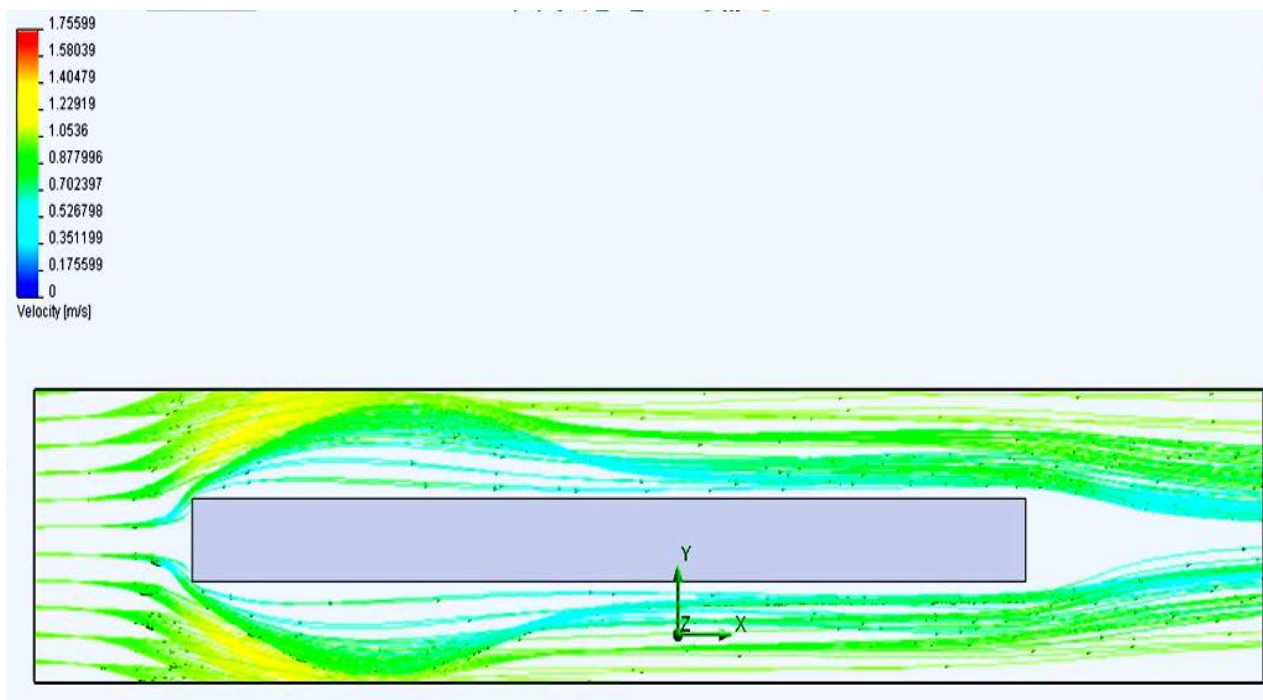
Výpočet vztlaku profilu F_y (N):

$$F_y = c_y \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v^2 \Rightarrow F_y = 1 \cdot \frac{998,0}{2} \cdot 0,02795 \cdot 1^2 = 13,947N$$

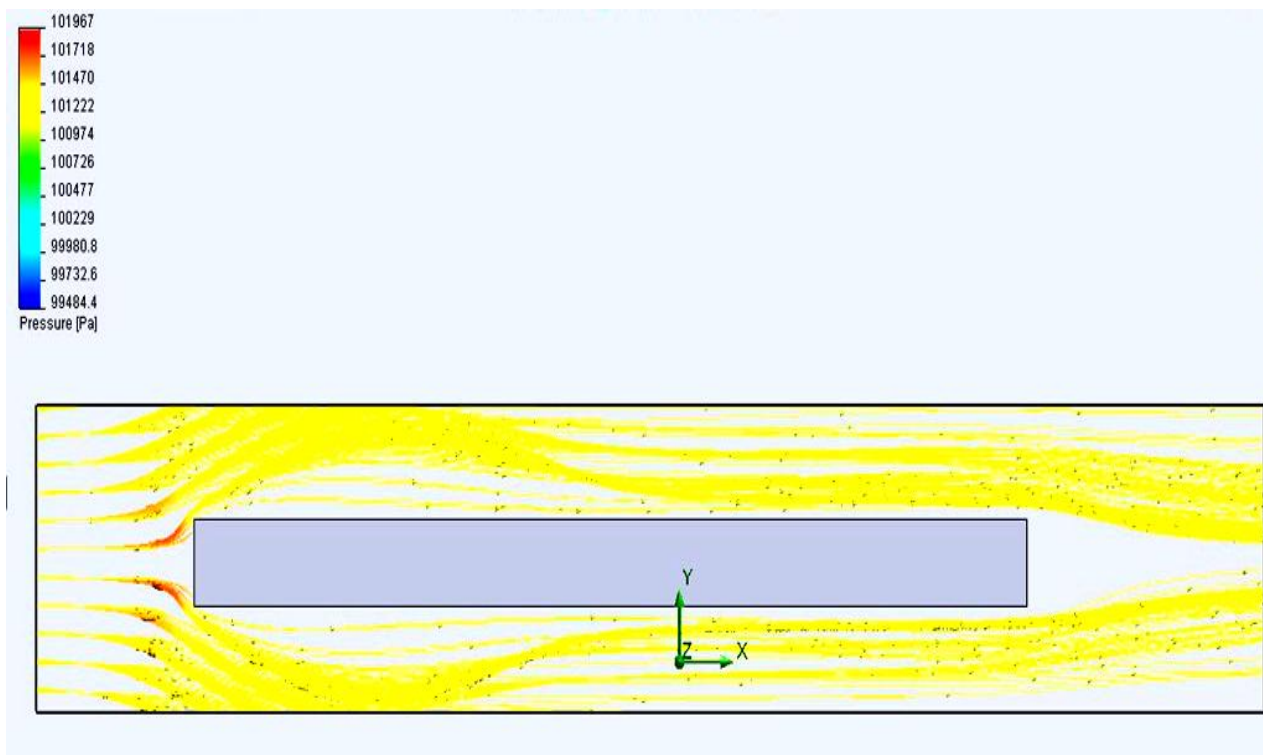
Tyto výpočty jsou kompletně uvedeny v [Excelu](#) a jsou uvedeny jako teoretické. Sloužili nám ke stanovení prvních rozměrů lopatky i mechanismu. Skutečné síly působící na lopatky byly vypočteny a nasimulovány pomocí programu. Do programu musely být nadefinovány vstupní parametry, podle kterých byl schopen s určitou přesností spočítat daný profil. Modely jsou ofukovány proudem tekutiny dle zadaných hodnot v programu. Tento program funguje na principu větrného tunelu. Sledovali jsme jednotlivé hodnoty, které byly získány měřením [odpor F_x (N), vztlak F_y (N), tlak p (Pa)]. Tyto hodnoty byly vzájemně porovnávány mezi jednotlivými lopatkami, u nichž byla zvolena jako proměnná poloměr vykrojení [R_1 (mm), R_2 (mm)]. Ze získaných parametrů jsme zjistili, která lopatka má nejlepší vlastnosti při obtoku a zároveň má dostatečný vztlak. Úhel nátoky pro výpočet byl stanoven ($\alpha = -4^\circ$) a ten byl ponechán jako konstanta u všech profilů lopatek.

7 Základní porovnání profilů

Po základní porovnání byla použita rovinná deska o šířce, tloušťce a délce stejné jako má lopatka. Získané hodnoty nám ukázaly, jak se daná tekutina chová při obtékání rovinné součásti.



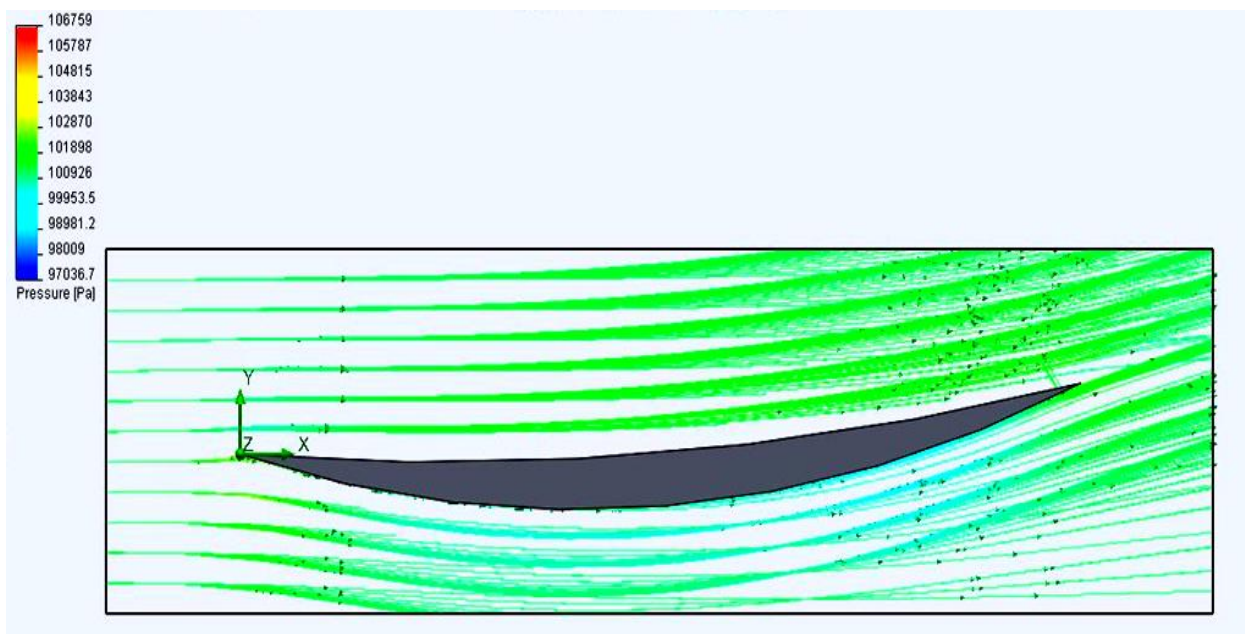
Obrázek 13 - Znázornění rychlosti obtékané součásti



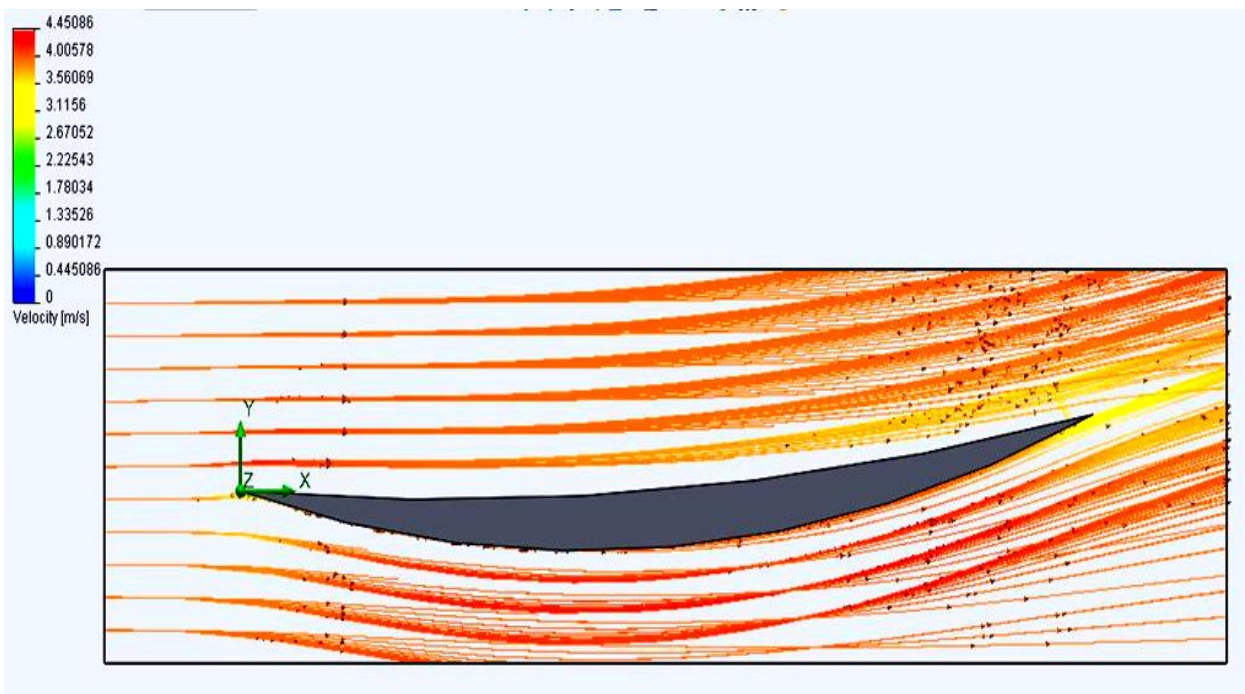
Obrázek 14 - Znázornění tlaku obtékané součásti

Profil lopatky s vykrojením $R_1 = 600$ mm, $R_2 = 1500$ mm

Tento profil lopatky má malé vykrojení a vyznačuje se nízkým odporem, ale i vztlakem, který je pro naše účely důležitý. Z těchto důvodů byl profil označen za nevyhovující a byly zmenšeny poloměry vykrojení.



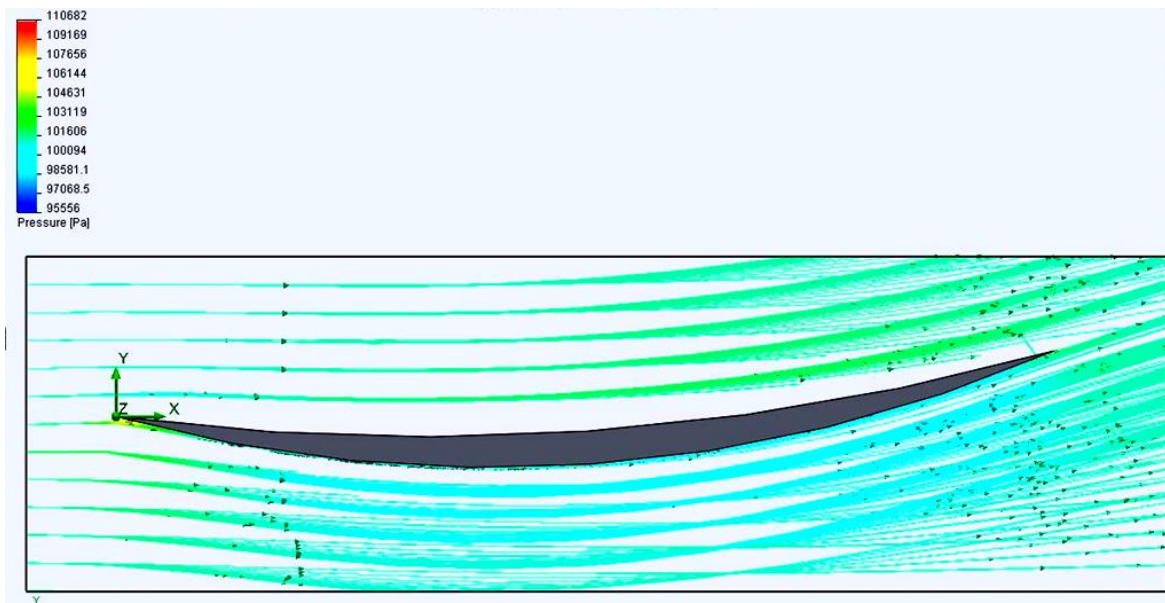
Obrázek 15 - Tlak tekutiny na profil 600_1500



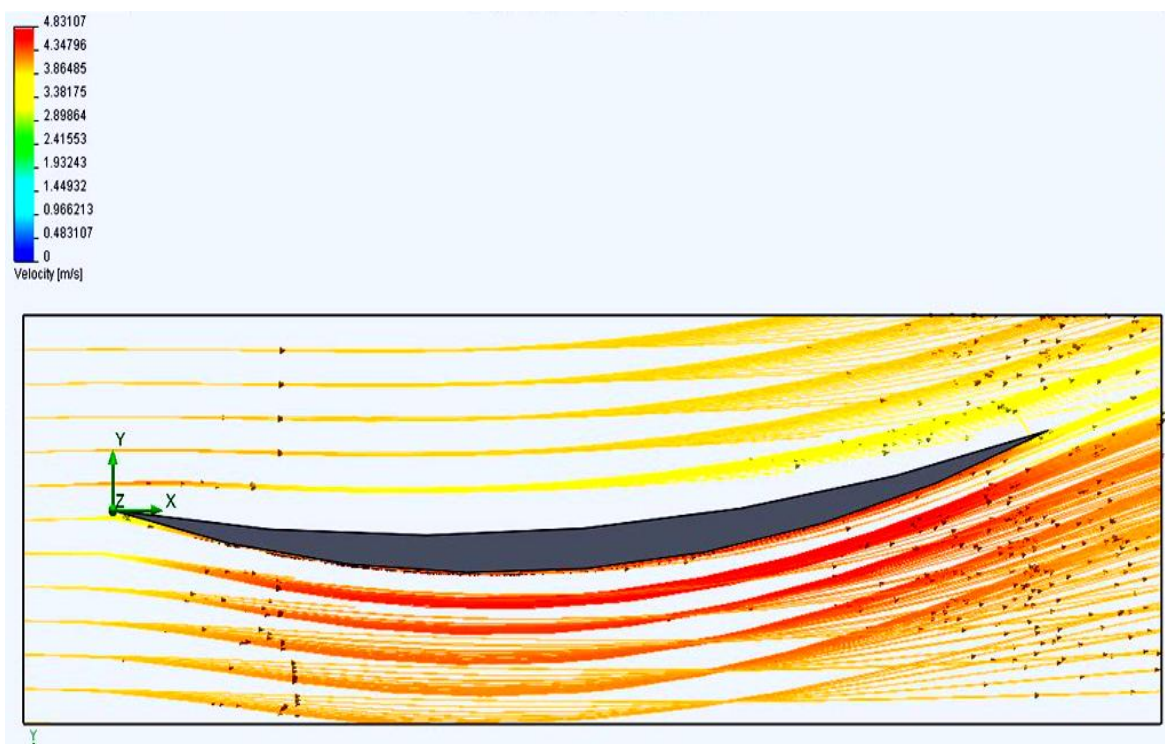
Obrázek 16 - Rychlost tekutiny na profil 600_1500

Profil lopatky s vykrojením $R_1 = 600$ mm, $R_2 = 1000$ mm

Zmenšení poloměru vykrojení lopatky mělo za důsledek malé zvýšení odporu tlaku, ale zvýšil se i vztlak.



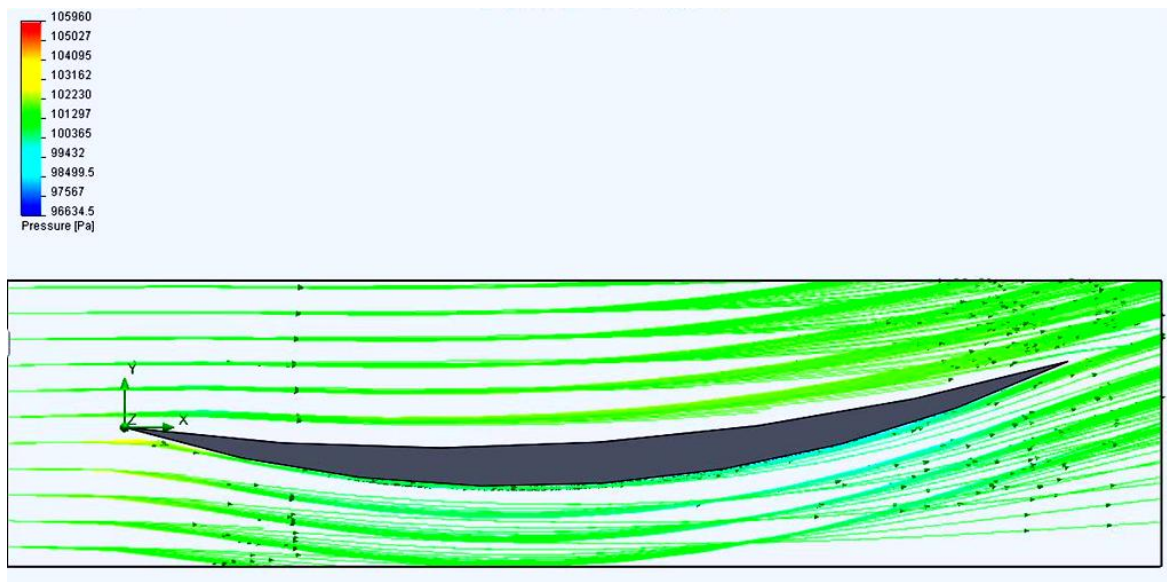
Obrázek 17 - Tlak tekutiny na profil 600_1000



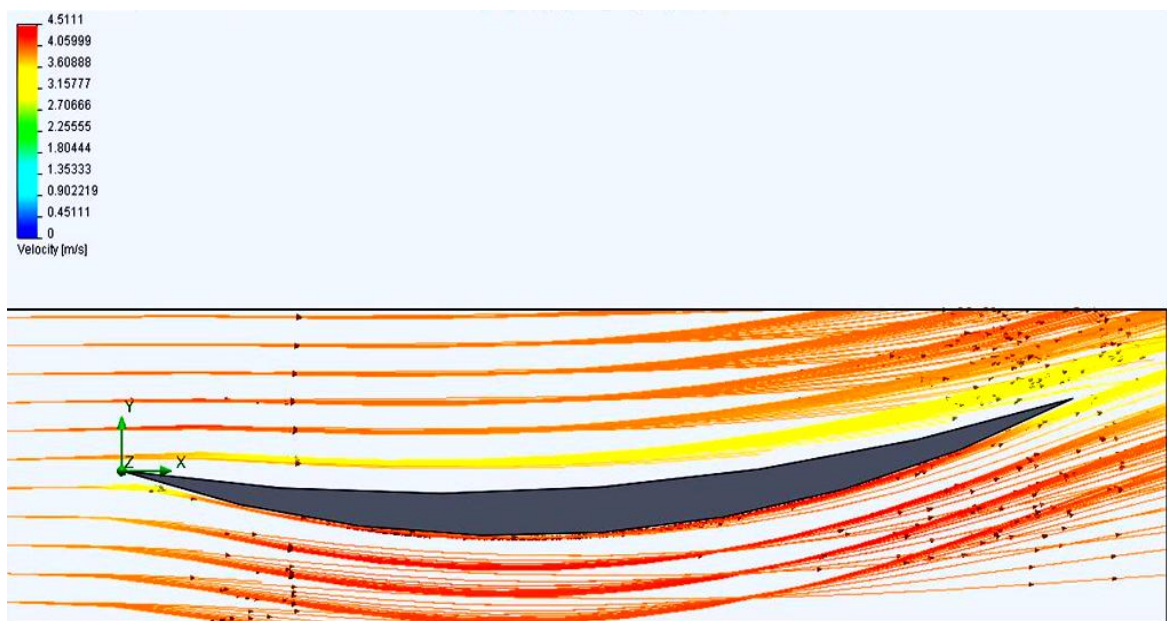
Obrázek 18 - Rychlost tekutiny na profil 600_1000

Profil lopatky s vykrojením $R_1 = 550$ mm, $R_2 = 1000$ mm

Na tomto profilu byly zmenšeny poloměry vykrojení R_1 o 50 mm. Odpor tlaku na lopatku zůstává stejný, ale vlivem zmenšení poloměru nám klesl i vztlak.



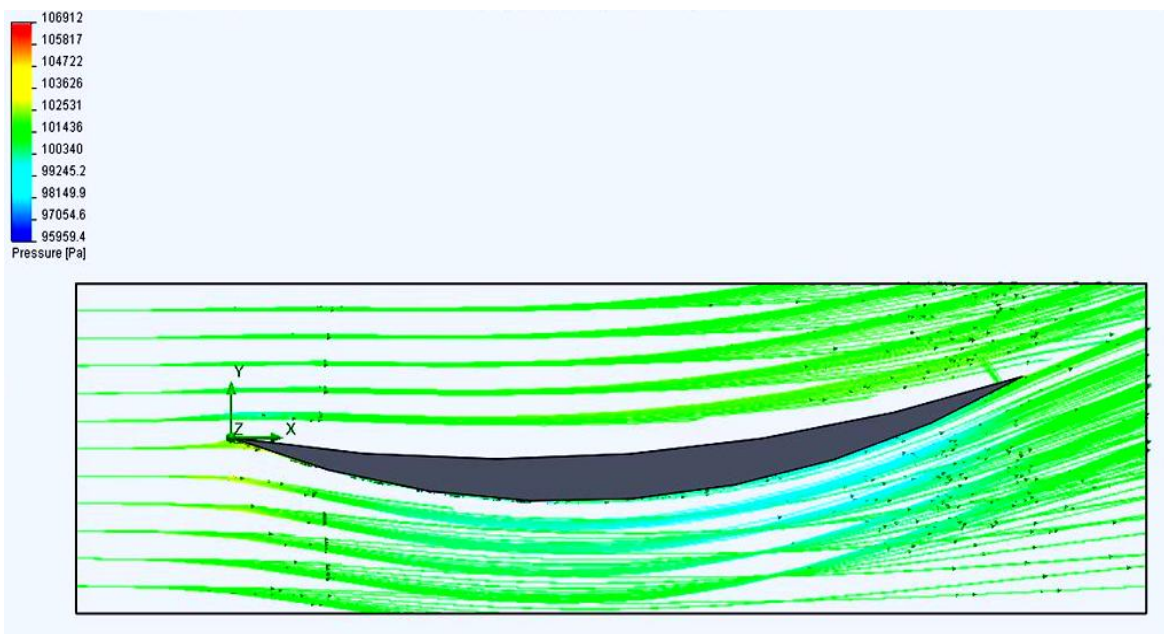
Obrázek 19 - Tlak tekutiny na profil 550_1000



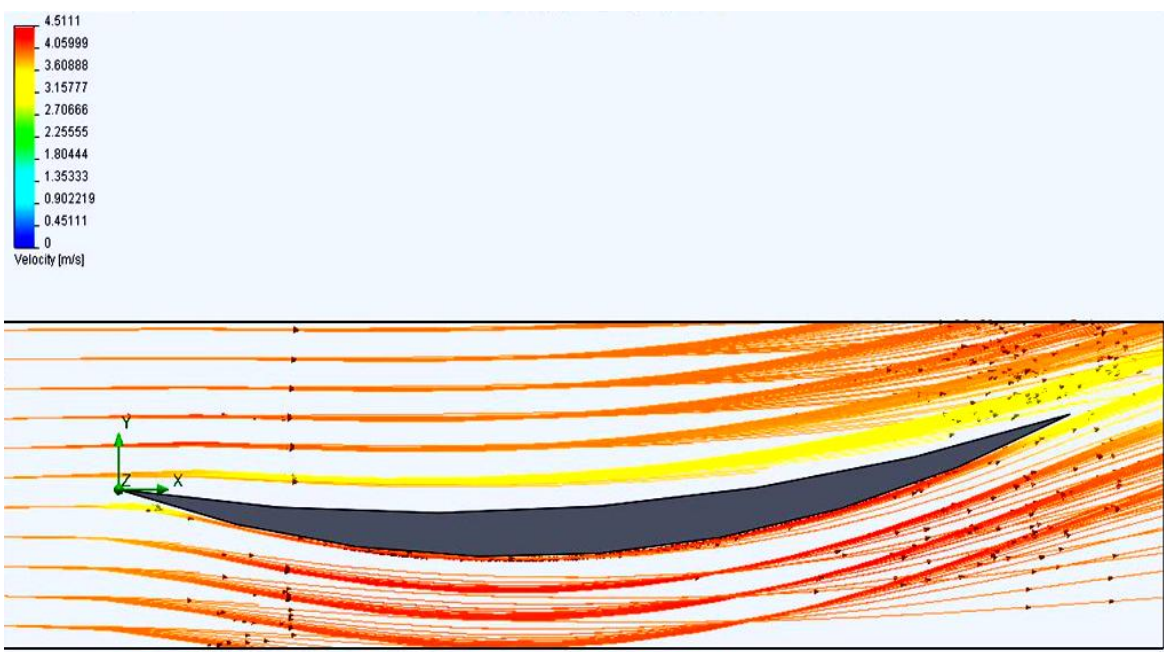
Obrázek 20 - Rychlost tekutiny na profil 550_1000

Profil lopatky s vykrojením $R_1 = 500$ mm, $R_2 = 950$ mm

Vykrojení tohoto profilu bylo zmenšeno od předešlého v obou poloměrech. Tímto zmenšením poloměrů jsme dosáhli zvýšení odporu tlaku, ale začal nám růst opět vztlak.



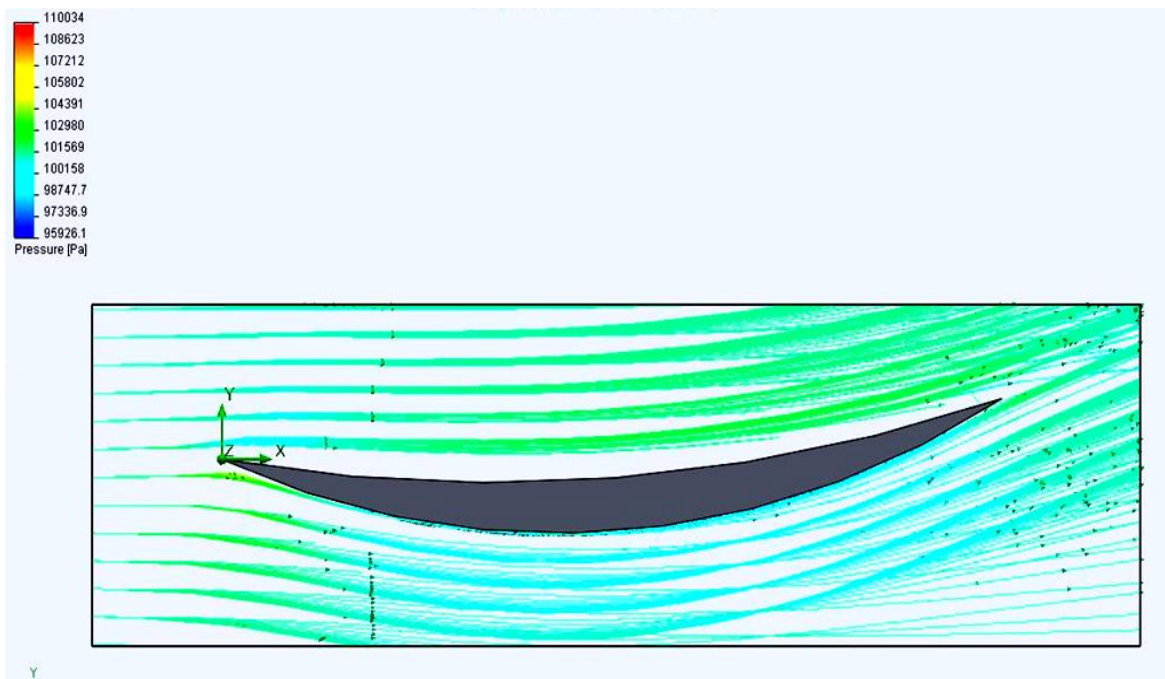
Obrázek 21 - Tlak tekutiny na profil 500_950



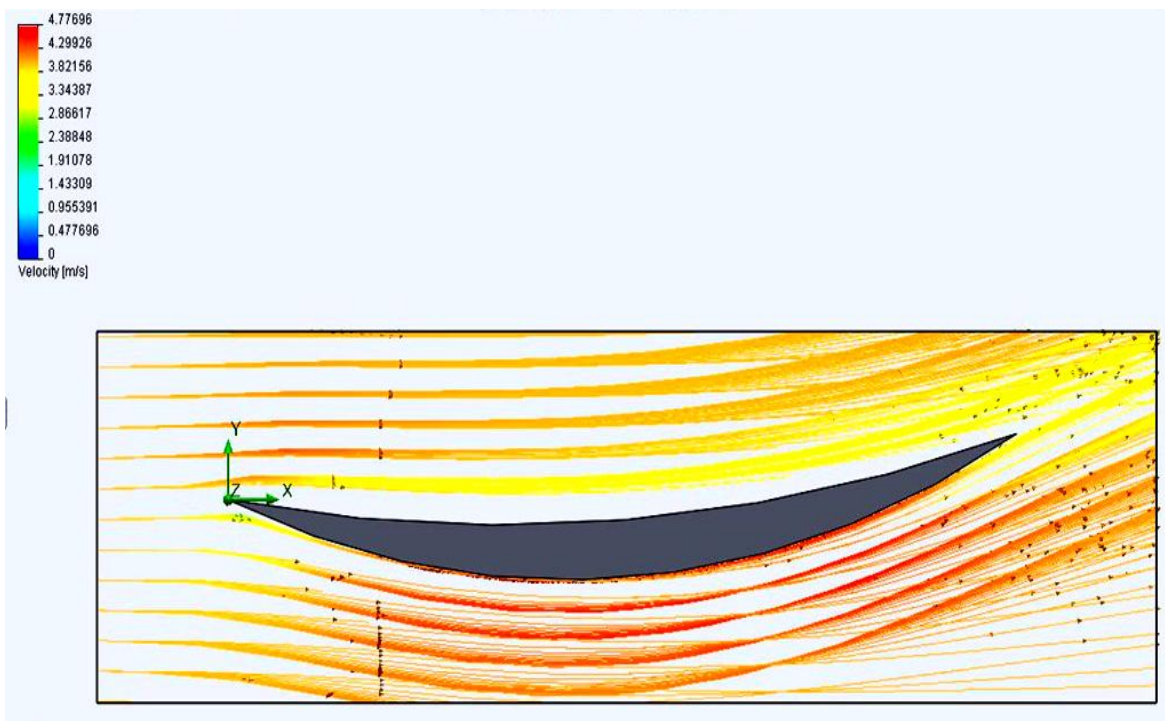
Obrázek 22 - Rychlost tekutiny na profil 500_950

Profil lopatky s vykrojením $R_1 = 450$ mm, $R_2 = 900$ mm

Tento profil nemá od předešlého lepší vlastnosti, v důsledku menšího vykrojení R_1 vzrostl odpor tlaku a klesl vztlak.



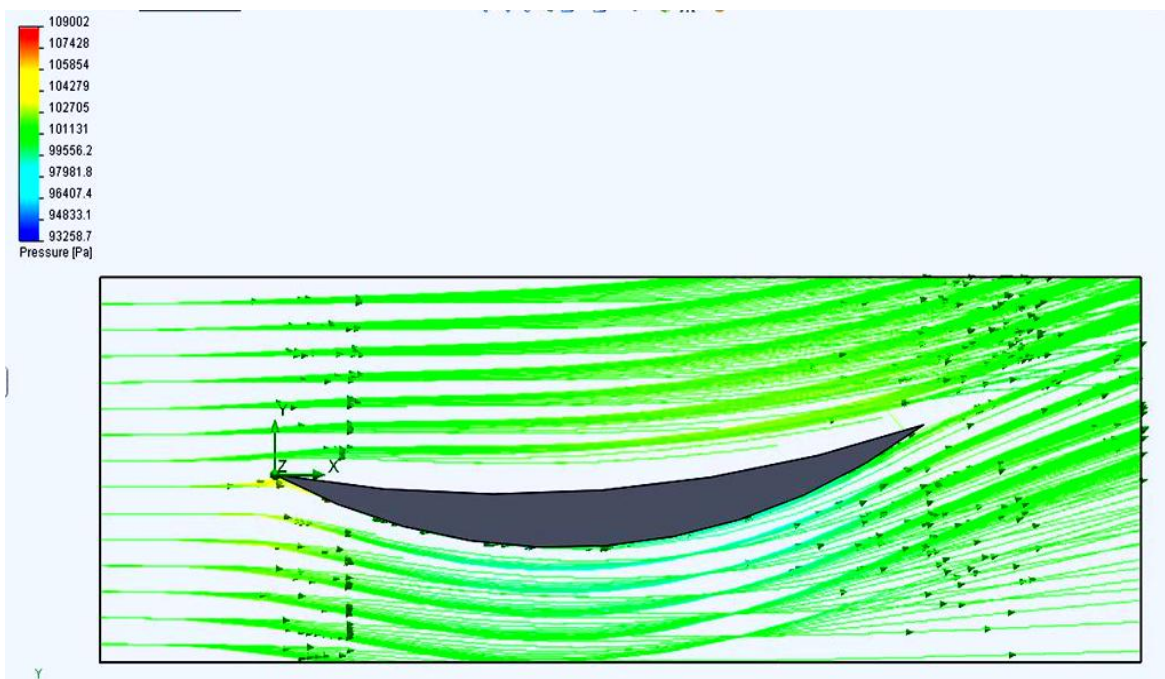
Obrázek 23 - Tlak tekutiny na profil 450_900



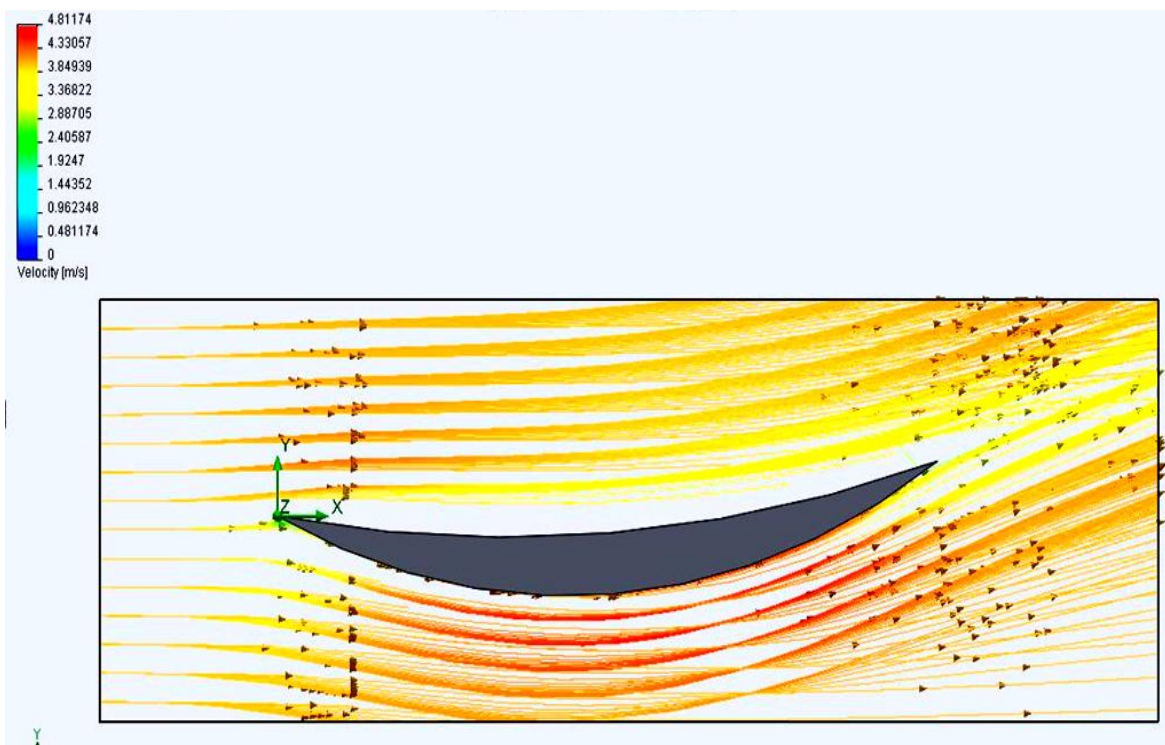
Obrázek 24 - Rychlost tekutiny na profil 450_900

Profil lopatky s vykrojením $R_1 = 400$ mm, $R_2 = 900$ mm

U tohoto profilu bylo dosaženo optimálního vykrojení tak, že byl zvětšen poloměr vykrojení R_1 a R_2 zůstalo stejné. Odpor tlaku na profil se nám o málo zvýšil, ale vztlak nám vzrostl cca o 30%. Tento návrh profilu byl uznán za optimální, díky jeho rozměrům a hodnotám odporu a vztlaku.



Obrázek 25 - Tlak tekutiny na profil 400_900



Obrázek 26 - Rychlost tekutiny na profil 400_900

Tabulka naměřených hodnot vztlaku F_y (N) a odporu F_x (N) u jednotlivých profilů.

Lopatka: $R_1 = 600$ mm, $R_2 = 1500$ mm	
F_x (N) = 32,6789	F_y (N) = -168,72
Lopatka: $R_1 = 600$ mm, $R_2 = 1000$ mm	
F_x (N) = 41,8704	F_y (N) = -182,793
Lopatka: $R_1 = 550$ mm, $R_2 = 1000$ mm	
F_x (N) = 41,8958	F_y (N) = -150,041
Lopatka: $R_1 = 500$ mm, $R_2 = 950$ mm	
F_x (N) = 49,9171	F_y (N) = -169,078
Lopatka: $R_1 = 450$ mm, $R_2 = 900$ mm	
F_x (N) = 56,0701	F_y (N) = -166,792
Lopatka: $R_1 = 400$ mm, $R_2 = 900$ mm	
F_x (N) = 69,0068	F_y (N) = -225,876

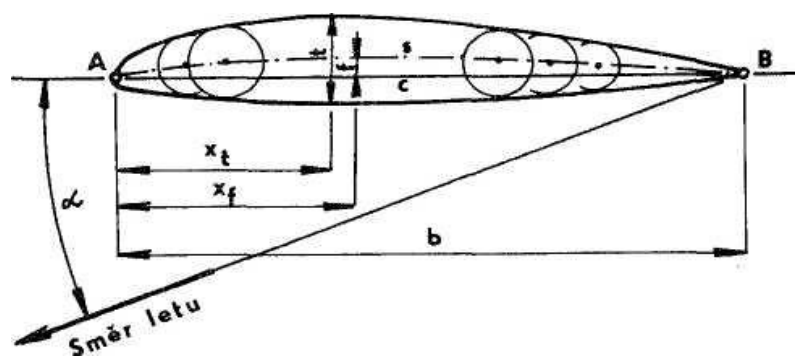
Tabulka 3 - Tabulka s hodnotami jednotlivých profilů

Tvary profilů

Profilu mohou mít různý tvar. Mohou být tenké a zakřivené, delší užší nebo s tlustým profilem. Základním znakem profilu je horní a spodní obrys, náběžný a odtokový bod. Spojnice mezi náběžným a odtokovým bodem se nazývá tětíva profilu a vzdálenost mezi náběžným a odtokovým bodem udává hloubku profilu. Střední křivka profilu vznikne spojením středů kružnic vepsaných v profilu. Udává velikost a polohu u jejího vnějšího prohnutí od tětivy profilu.

Tloušťka profilu se mění s hloubkou profilu. Její hodnota se obvykle udává v procentech hloubky profilu.

Uhel náběhu profilu je dán úhlem, který svírá směr proudu s tětívou profilu, má za příčinu vztlak na profilu.



A – náběžný bod, B – odtokový bod, c – tětiva profilu, s – střední křivka profilu, t – maximální tloušťka profilu, f – maximální prohnutí, x_t – vzdálenost maximální tloušťky, x_f – vzdálenost maximálního prohnutí, b – hloubka profilu, α – úhel náběhu

Obrázek 27 - Základní znaky profilu

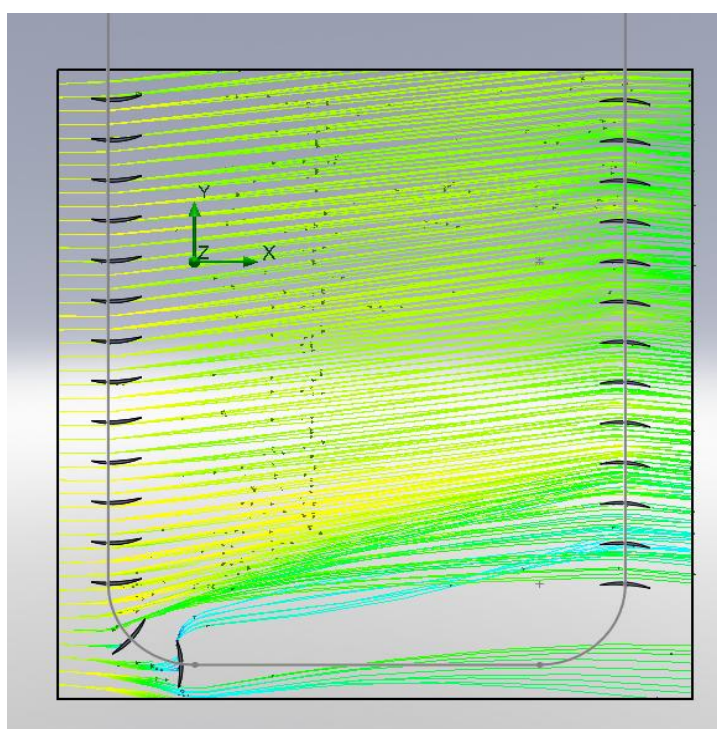
Charakteristickými znaky tvaru profilu je především maximální tloušťka a tvar prohnutí střední křivky. Vlastní tvar bývá určen geometrickými souřadnicemi.

Vyhodnocení vlastního profilu

Návrh tvaru profilu závisí na mnoha různých hodnotách, které ovlivňují jeho tvar. Pro naše účely postačil tvar duté polokoule obtékané po směru proudu. Určení tohoto profilu nebylo nijak složité. Z důvodu jeho jednoduchému tvaru, který je osově souměrný, jsme ve výpočtu použili jen jeho tvarové součinitele c_x , c_y . Rozměry profilu lopatky byly určeny dle potřeb tak, aby s nimi byla co nejjednodušší manipulace. Jako první byl posuzován návrh rovinné desky, v programu byly vypočítány, vyhodnoceny její vlastnosti vůči obtékané tekutině. Poté následoval návrh tvaru profilu lopatky s minimálním vykrojením. Tento tvar byl porovnáván s naměřenými hodnotami rovinné desky. Tímto způsobem porovnávání byla prováděna další měření na různě zakřivených profilech lopatky. Úkolem bylo dosáhnout co největšího vztlaku (F_y) a co možná nejmenšího odporu (F_x). Výsledného profilu lopatky bylo dosaženo a byl získán profil, který má dostatečný vztlak a relativně malý odpor. Není vyloučeno, že při jiném konstrukčním provedení profilu lopatky by nemohlo dojít k získání lepších vlastností vztlaku a odporu.

8 Proudění v mříži, princip funkce

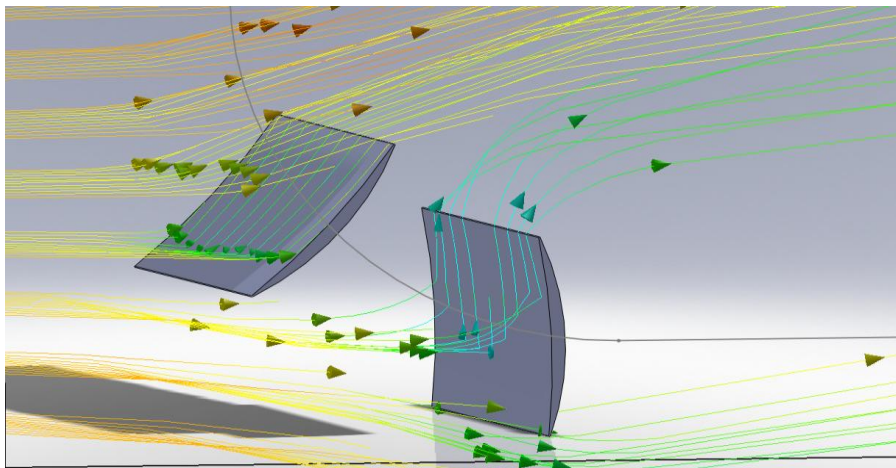
Získaný vlastní profil umístíme do lopatkové mříže s úhlem náběhu ($\alpha = -4^\circ$). Mříž získáme, pokud na ozubený řemen nebo řetěz připevníme lopatky nad sebou v dané vzdálenosti tak, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivnění. Při proudění kapaliny korytem narazí proud na lopatku, ta jeho přímočarý směr změní na směr šikmý, který proudí v prostoru mezi lopatkami. Lopatky v druhé řadě změní směr tekutiny z šikmého zpět na směr přímočarý. Tím dochází k předání energie mezi lopatkou a danou tekutinou. K této změně proudu tekutiny dochází v celé délce přední strany mříže až po poloměr přední kladky, která mění úhel nátoky tekutiny.



Obrázek 28 - Změna směrů proudu tekutiny

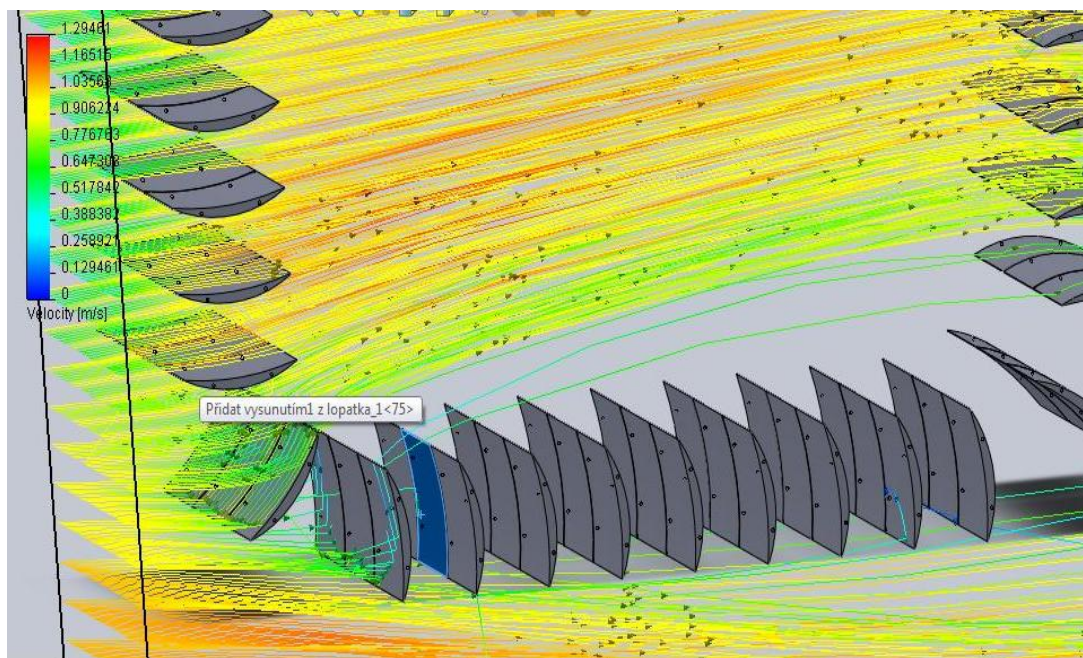
Změna úhlu nátoky má za příčinu odhození proudu tekutiny do meziprostoru lopatek pod jiným úhlem a vzniká malé víření proudu za lopatkou v přední části mříže. Tím dochází ke ztrátě přenosu energie mezi lopatkami vlivem víření.

Lopatka dorazí do polohy kolmé ke směru proudění, kdy na celou plochu lopatky působí proudění tekutiny. Získáváme největší sílu působící na lopatku. Se vzniklou silou dostáváme maximální využití energie z dané tekutiny, tato energie uděluje lopatce větší zrychlení než u lopatek obtékaných vodorovně k ose proudění. Tím, že je lopatka kolmo k ose proudění, vzniká za první lopatkou velké víření a dostáváme prostor, ve kterém dochází k minimálnímu využití energie z proudu tekutiny.



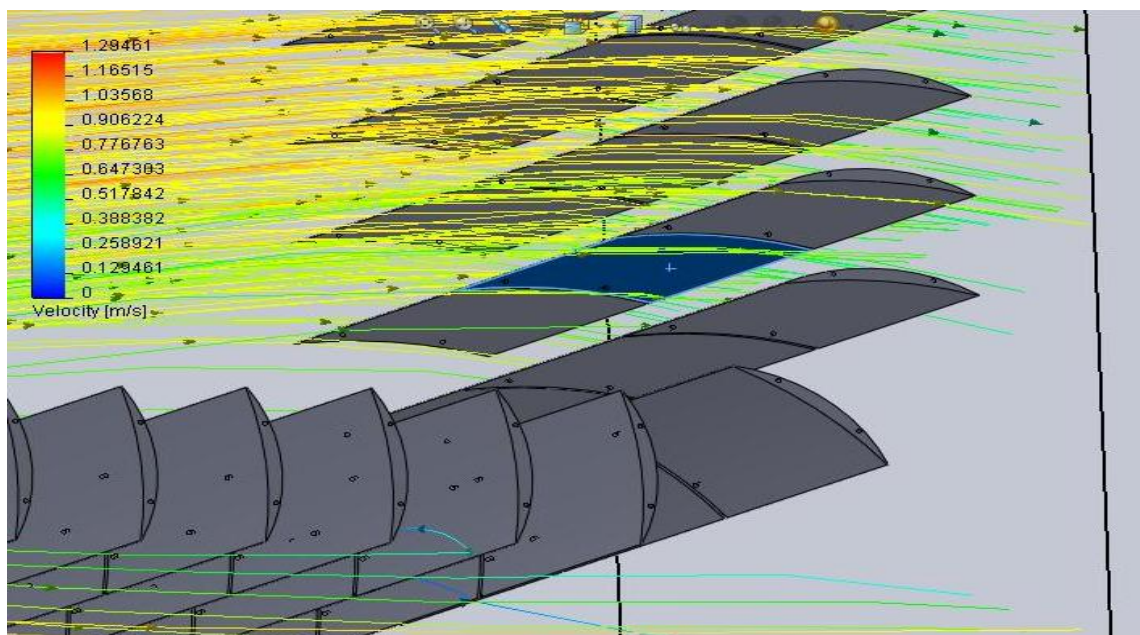
Obrázek 29 - Lopatky na přední straně kladky

Ze vzrůstající vzdáleností lopatek od první lopatky dochází k malému přenosu energie vířené tekutiny. Při změně úhlu nátku tekutiny na druhé (zadní) kladce vlivem změny směru proudění tekutiny získáváme energii z vířené tekutiny, která byla odhozena od první lopatky kolmo k ose proudění.



Obrázek 30 - Lopatky kolmo k ose proudění

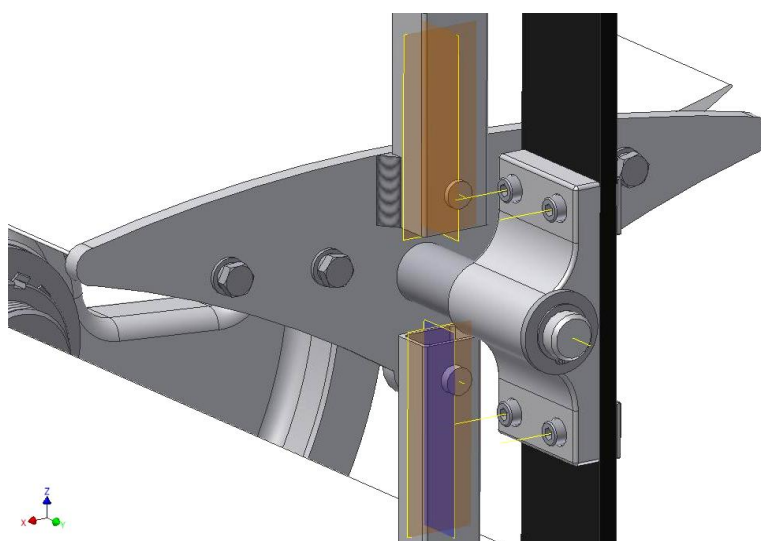
Dostane-li se lopatka do polohy rovnoběžné k ose proudění na zadní straně mříže, dochází k otočení lopatky, a tím se získá ideální obtok tekutiny. Díky osově souměrnému tvaru má lopatka stejnou funkčnost v obou případech. Proudění dále prochází stejně jako v přední části mříže s tím, že se mění ze šikmého proudění zpět na rovnoběžné proudění.



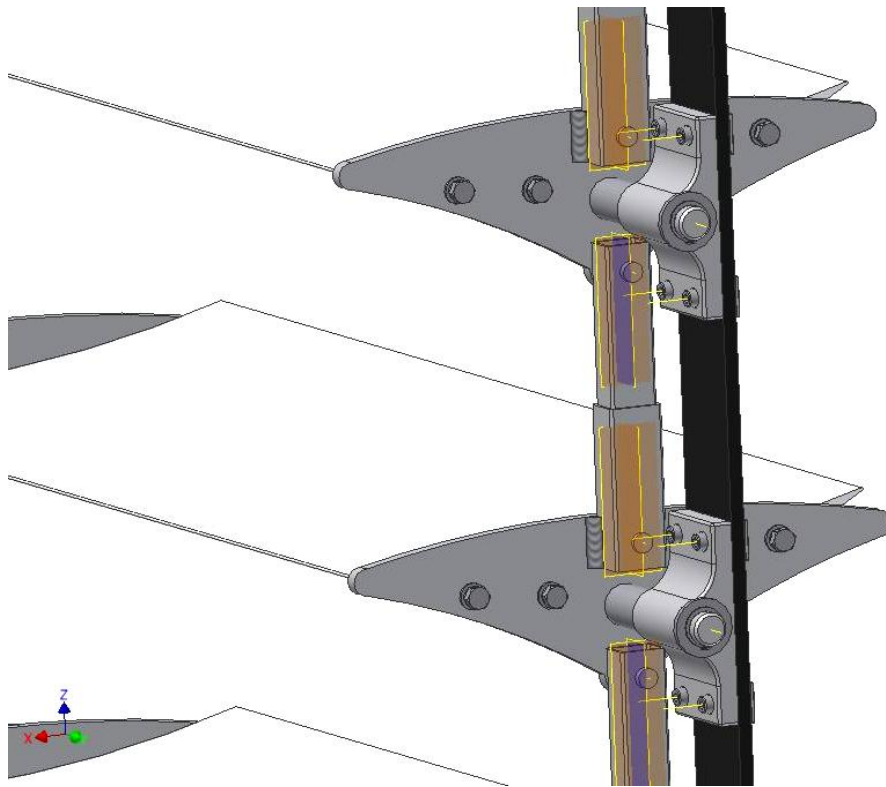
Obrázek 31 - Lopatky v zadní části mříže

Upevnění lopatky, vzájemná poloha

Lopatky jsou připevněny na vnější straně řemenu nebo řetězu a jsou navzájem propojeny táhly tak, aby si zachovali konstantní úhel náběhu a stejnou vzdálenost. Mechanismus je uzpůsoben tak, že na jedné lopatce je připevněno táhlo napevno a na druhé je zachyceno na čepu. Táhlo je délkově měnitelné kvůli obloukovým přechodům na kladkách. Lopatka je pomocí šroubů upevněna v profilové desce, na které je čep, jenž je uchycen v domku. Domek je poté mechanicky upevněn pomocí šroubů a tvarových podložek se závitem na řemenu nebo řetězu. Konstrukční provedení pro řetěz a řemen je jiné. Použité materiály na upevnění lopatky jsou z nerezové oceli.



Obrázek 32 - Uchycení lopatky na řemenu



Obrázek 33 - Vzájemná poloha lopatek

9 Vodní energie a její zdroje

Voda v přírodě může být nositelem mechanické, chemické a tepelné energie. Nejdůležitější formou je mechanická energie vody, která zahrnuje energii srážek, ledovců, moří a toků řek. Nejčastěji se využívá mechanická (hydraulická) energie vodních toků.

Energie mořských vln je obrovská, ale praktické využití je problematické, protože příčinou vlnění je vír, mořská energie se vyznačuje velkou nepravidelností a nestálostí.

Voda - forma energie

Kinetická energie je ve vodních tocích dána rychlostí proudění a závisí na spádu toku. Její využití je možné rovnotlakými turbínami, založených na principu rotačního kola, např. vodní kolo, turbíny typu Bánki a Pelton. Optimální využití energie vyžaduje, aby obvodová rychlost stroje byla nižší, než je rychlost proudění, jinak lopatky pouze ustupují proudu bez možnosti převzetí energie a jakéhokoliv zatížení. Otáčky rovnotlakých strojů jsou malé, a to z důvodu polovičního tlaku, který je dán menší obvodovou rychlostí kola oproti rychlosti proudění a také z důvodu stejného tlaku na celé ploše. Voda vstupuje do turbíny pouze v některých částech obvodu a nezahltí celý obvod plynule. Mluvíme o takzvaném částečném obstřiku.

Potenciální energie vzniká získáním hladiny vody o větší výšce, z níž voda proudí vhodným přivaděčem do míst s nižší výškou hladiny. Rozdíl těchto výškových potenciálů vytváří tlak. Tento druh energie se využívá u přetlakových (reakčních) turbín, např. turbíny typu Kaplan, Francis, Reiffenstein, turbíny vrtulové a čerpadla v turbínovém provozu. V přetlakové turbíně se část tlakové energie přemění na rychlost pro zajištění požadovaného průtoku, zbylý tlak se při průchodu lopatkou turbíny snižuje, a když ji na konci lopatky opouští, je prakticky využitý. Otáčky u přetlakové turbíny jsou několikrát vyšší, než je rychlost prouděné tekutiny.

10 Využití zařízení

Tento druhu turbíny se využívá za účelem využití malých spádů od 0,6 m, ale velkých průtoků. Proto je často využíván u velkých zavlažovacích kanálů, přírodních kanálů na chlazení, i u derivačních kanálů. Tyto turbíny mohou také využívat principu přílivu a odlivu. Takto získanou energii by bylo možno využívat ve velké míře. Jenže z důvodů působení vnějších činitelů jako je slaná voda, je tento způsob velice obtížný na správnou funkci a bezporuchovost zařízení. V některých případech se při změně profilu lopatek může turbína změnit na čerpadlo. Jelikož máme výkonnější čerpadla, která dokážou pracovat na principu turbíny i na principu čerpadla, toho druhu zařízení se moc nevyužívá. Tento druh turbíny pracuje na principu Schneiderovy jednotky, jedná se o přetlakovou turbínu využívající rychlost tekoucí vody. Schneiderova jednotka byla nainstalována poprvé v San Francisku v zavlažovacím kanále. Tento druh zařízení není v dnešní době často využíván, ale s posunem technologií se může uplatnit v získávání energie z moře vlivem přílivu a odlivu.

10.1 Využití získané energie

Získáváme energii vlivem proudění tekutiny, která předává část své kinetické energie lopatce a ta se vlivem působení síly posouvá. Posunem lopatek dochází k otáčivému pohybu na kladkách a získáváme rotační pohyb na konci hřídele. Z důvodu malých otáček musíme otáčivý pohyb z převodovat na rychlejší, dále otáčivý pohyb převádíme do elektrogenerátoru. Elektromotor je asynchronní s kotvou nakrátko.

Získaná energie je v podobě elektrické energie. Takto získaná energie je možná k zahřátí určeného množství vody, nebo k dodávání elektrické energie do domácí sítě. Z důvodů nestálosti protékané tekutiny je obtížné udržet požadovanou frekvenci pro dodávání do elektrické sítě.

10.2 Stanovení výkonu

Výkon daného zařízení lze stanovit jako součin působící síly na lopatku a rychlosti jejího posunu. Získaná síla způsobuje otáčivý pohyb celého zařízení. Tento způsob vyjádření lze dosadit do vzorce na výkon. Od vypočteného výkonu odečteme příkon a vyčíslíme účinnost zařízení. V našem případě byla určena předběžně rychlost otáčení.

Sílu jsme získali z programu na proudění. Daný výkon byl určen jako předběžný. Výpočtem byl získán cca 5kW výkon a s účinností, která se pohybovala okolo 25%. Vypočtený výkon a účinnost nejsou přímo charakteristické, protože se jedná o předběžný návrh. Pro určení skutečného výkonu bychom museli provést měření na zkušební vzorku a dále určili celkovou účinnost.

11 Údržba zařízení

Jde o zařízení, které pracuje ve vodním prostředí. Vlivem působení činitelů jako jsou vodní vlhkost, chemické složení vody, vnější činitelé mráz, teplota, sluneční záření, je zařízení vystaveno poměrně velké zátěži. Pro zachování stálého provozuschopnosti musíme provádět údržby v pravidelném rozmezí. Údržbu provádíme na všech funkčních mechanismech a také na elektrickém zařízení, které je citlivé na vlhkost. Údržbu na elektrickém zařízení provádí specializovaná firma, od které požadujeme záruky na plynulý chod a bezproblémovost zařízení.

Mazání a mazací soustava

Jedná se o ložiska, která jsou zatížena na tlak, je za potřebí provádět revize uložení z důvodu neproniknutí vody do prostoru ložisek a naopak, neproniknutí mazacího tuku do vody. Ve spodní části (pod vodou) jsou ložiska kluzná ze speciálního materiálu, který není zapotřebí mazat, ale musíme provádět kontroly, zda fungují správně. Ve vrchní části jsou ložiska valivá, mají delší životnost a mazání je dodáváno centrálně. Jsou mazána tukem. Jednotlivé druhy mazacích tuků jsou vybrány dle dodavatele. Jede o zařízení, které přichází do styku s vodou, a proto musíme brát ohled na životní prostředí.

Ochrana proti korozi

Především je o materiály nerezuvzdorné, které z části odolávají působení vnějších činitelů. Z nerezuvzdorných materiálů je vyrobeno uchycení lopatek a některé části nosných prvků. Konstrukce je z konstrukčních ocelí, které musíme chránit nátěrem. Nátěry na konstrukci nad vodou můžeme obnovovat, pokud dochází k jejímu poškození. Konstrukce, která se nachází pod vodou, bohužel nemůžeme nijak chránit, jen v případě poškození musíme danou součást opravit nebo vyměnit. Kladky jsou vyrobeny jako odlitky a nepředpokládá se u nich nijak velké poškození, pokud se nevyskytne vnitřní vada, která se projeví trhlinou na povrchu součásti.

Voda procházející zařízením by měla být zbavena hrubých nečistot, jako jsou kameny, kmeny nebo jiné naplaveniny. Z tohoto důvodu jsou před zařízením česle, které zabraňují průniku hrubých nečistot. Jsou v dostatečné vzdálenosti tak, aby nedocházelo k nadměrnému víření.

11 Závěr

Cílem této práce bylo přiblížit problematiku proudění tekutin a její vliv na profily lopatek. Práce obsahuje přejaté informace z odborné literatury, především se jedná o literaturu zaměřenou na aerodynamiku a aeromechaniku. Jsou zde použity i informace z různých prací zaměřených na proudění tekutin. Tato práce obsahuje nástin výpočtu aerodynamické síly a aerodynamického odporu. Jelikož výpočty profilu jsou složité, byly použity specializované programy, které nám byly schopny s určitou přesností vypočítat chování tekutiny.

Tato práce byla zaměřena na chování tekutiny a na profily lopatek. Bylo zjišťováno vzájemné chování a ovlivňování proudu tekutiny. Snahou bylo navrhnout profil lopatky tak, abychom dosáhly co nejlepších podmínek pro obtok tekutiny a zároveň, abychom využili co největší množství energie tekutiny (vody). Jednotlivé profily byly mezi sebou porovnávány na základě odporu a vztlaku. Cílem bylo dosáhnout profilu, který má dostatečně velký vztlak a relativně malý odpor.

Výsledný profil lopatky byl vsazen do mříže. Lopatky byly uspořádány tak, abychom dosáhli velkého využití energie vody, ale zároveň aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování. Při simulaci obtoku bylo sledováno proudění v mříži v dolní části, kdy je lopatka kolmo k ose proudění, za první lopatkou vzniká velké víření a dochází ke ztrátě přenosu. S rostoucí vzdáleností klesá ztráta, následně lopatka mění uhel nátoky, protože přechází do zadní části mříže, ve které je rovnoběžná s osou proudění. Zde dochází ke stejnému přenosu energie jako v přední části mříže. Dále tekutina odtéká kanálem, jedná se o přetlakovou turbínu, kdy vodě je odjímána část tlakové energie.

Tato práce obsahuje výčet základních podmínek pro proudění. Vysvětluje, jak vzniká vztlak, odpor. Jaké máme druhy proudění na profilu a co nám ovlivňují. Objasňuje základní tvary profilů, které se využívají jak v letectví, tak v různých odvětvích, ve kterých se využívá proudění tekutin. Součástí této práce je 3D návrh lopatky a celkového zařízení, na kterém byly zjišťovány podmínky pro proudění.

Anotace

Příjmení a jméno autora:	Balhárek Vladimír
Název školy:	SPŠS Olomouc, tř. 17. listopadu 49
Vedoucí práce:	Ing. Vladimír Houšť
Počet stránek:	43
Počet příloh:	2
Počet titulů použité literatury a pramenů:	6
Klíčová slova:	Proudění tekutin, tvar profilů, Schneiderova turbína, vztlak profilu, odpor profilu

V tomto projektu byla řešena problematika proudění těles v tekutinách. Byly řešeny vlastnosti obtoku tekutiny různých tvarů těles. Tato práce je zaměřena především na obtok profilů lopatek, na zjišťování vlastností jednotlivých profilů a chování tekutiny na jejich tvar. Vzájemně byly posuzovány jednotlivé tvary a jejich hloubky vykrojení, dále byly vyhodnocovány jejich obtokové parametry. Jednotlivé hodnoty jsou zjišťovány pomocí programů na proudění. Závěrem vyhodnocení je lopatka, která měla co možná neoptimalnější odpor a co největší vztlak. Tato práce mi rozšířila znalosti v oboru strojírenském, zkoumaná problematika mě velmi zaujala. Na vysoké škole bych se chtěl otázce proudění těles v tekutinách nadále věnovat. Práce na tomto projektu i samotné zpracování výsledků byly pro mě velmi přínosné.

Resumé

V tomto projektu byla řešena problematika proudění těles v tekutinách. Byly řešeny vlastnosti obtoku tekutiny různých tvarů těles. Tato práce je zaměřena především na obtok profilů lopatek, na zjišťování vlastností jednotlivých profilů a chování tekutiny na jejich tvar. Vzájemně byly posuzovány jednotlivé tvary a jejich hloubky vykrojení, dále byly vyhodnocovány jejich obtokové parametry. Jednotlivé hodnoty jsou zjišťovány pomocí programů na proudění. Závěrem vyhodnocení je lopatka, která měla co možná nejoptimálnější odpor a co největší vztlak. Tato práce mi rozšířila znalosti v oboru strojírenském, zkoumaná problematika mě velmi zaujala. Na vysoké škole bych se chtěl otázce proudění těles v tekutinách nadále věnovat. Práce na tomto projektu i samotné zpracování výsledků byly pro mě velmi přínosné.

This project solves the problem of flowing solids in liquids. There were dealt with by-pass fluid properties of objects of different shapes. This work is focused primarily on the bypass of airfoil profiles to detect the characteristics of individual profiles and fluid behavior of their shape. All individual shapes and depths knockouts were assessed, and their pass parameters were evaluated. Individual values are measured using the programs for flowing. The end of the evaluation is a blade that had the optimal possible resistance and maximum lift. This technical project has extended my knowledge in the field of engineering, the issues examined intrigued me very much. At university, I would like to devote to the question the flowing the solids in liquids. Work on the project and the actual processing of the results were very beneficial for me.

Seznam použitých zdrojů

1. *Obtékání těles*. [PDF] 2009.
2. **Balcarova, Lucie**. *Numerické řešení proudového pole v kompresorové lopatkové mříži*. [PDF] 2009.
3. **Brůha, Oldřich**. *Aeromechanika - Výkony letadel*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1957. L13-B3-4-II.
4. **Halagačka, Lukáš**. *Seminární práce z fyziky*. [PDF] 2004.
5. **Mágr, Josef**. *Malé vodní elektrárny*. [PDF] 2009.
6. **Vykouk, Vlastimil**. *Knižnice zájmové, branně technické a sportovní činnosti*. [PDF] Praha : TZ SportPropag, Praha, 1981.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Proudnice a proudová trubice	7
Obrázek 2 - Tečné napětí mezi vrstvami vazké (viskosní) tekutiny.....	7
Obrázek 3 - Mezní vrstva	8
Obrázek 4 - Obtékání těles na zakřiveném povrchu.....	11
Obrázek 5 - Rozložení přetlaku a podtlaku kolem profilu křídla	12
Obrázek 6 - Obtékání profilu křídla při malých úhlech náběhu; α - úhel náběhu ...	12
Obrázek 7 - Obtékání tenkého zakřiveného profilu křídla; α - úhel náběhu	12
Obrázek 8 - Znázornění poměru vztlaku a odporu při plynulém obtékání profilu..	13
Obrázek 9 - Znázornění poměru vztlaku a odporu při velkém úhlu náběhu	13
Obrázek 10 - Polára profilu	15
Obrázek 11 - Profil lopatky	16
Obrázek 12 - Schematické znázornění mechanismu	17
Obrázek 13 - Znázornění rychlosti obtékané součásti.....	19
Obrázek 14 - Znázornění tlaku obtékané součásti.....	19
Obrázek 15 - Tlak tekutiny na profil 600_1500	20
Obrázek 16 - Rychlost tekutiny na profil 600_1500	20
Obrázek 17 - Tlak tekutiny na profil 600_1000	21
Obrázek 18 - Rychlost tekutiny na profil 600_1000	21
Obrázek 19 - Tlak tekutiny na profil 550_1000	22
Obrázek 20 - Rychlost tekutiny na profil 550_1000	22
Obrázek 21 - Tlak tekutiny na profil 500_950	23
Obrázek 22 - Rychlost tekutiny na profil 500_950	23
Obrázek 23 - Tlak tekutiny na profil 450_900	24
Obrázek 24 - Rychlost tekutiny na profil 450_900	24
Obrázek 25 - Tlak tekutiny na profil 400_900	25
Obrázek 26 - Rychlost tekutiny na profil 400_900	25
Obrázek 27 - Základní znaky profilu.....	27
Obrázek 28 - Změna směřů proudu tekutiny	28
Obrázek 29 - Lopatky na přední straně kladky.....	29
Obrázek 30 - Lopatky kolmo k ose proudění	29
Obrázek 31 - Lopatky v zadní části mříže	30
Obrázek 32 - Uchycení lopatky na řemenu	30
Obrázek 33 - Vzájemná poloha lopatek.....	31

Cizojazyčný slovník

<u>Česky</u>	<u>Anglicky</u>
aerodynamika	aerodynamics
vyhodnotit	appraise
lopatka	blade
vztlak	buoyancy
obtékat	flow around
proudit	flow
tekutina	liquid
mechanismus	mechanism
optimální	optimal
poloha	position
tlak	pressure
problematika	problems
profil	profile
dosáhnout	reach
odpor	resistance
simulace	simulation
rychlost	velocity
tlaková energie	pressure energy

Přílohy

- 1) Výpočty mechanismu v tabulkovém procesoru.
- 2) 3D návrh modelu mechanismu.
- 3) Výkres formy lopatky.
- 4) Ekonomický výpočet formy lopatky.
- 5) Technologický postup výroby lopatky z programu na opracování.