



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

PROUDĚNÍ KOLEM WINGLETU

FLOW AROUND WINGLET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Grešáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Sluše

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Kristýna Grešáková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Sluše**
Akademický rok: 2015/16

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 bakalářské práce:

Proudění kolem wingletu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na modelové zkoušky, zvláště pak na proudění kolem wingletu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši v oblasti wingletů. Navrhnout winglet dle předem definovaných vlastností proudění a provést proměření vírových struktur vznikajících za lopatkou (křídlem) při použití wingletu i bez jeho použití.

Seznam literatury:

BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. Mechanika kontinua. Vyd. 4., rev. a upr.

Praha: Academia, 2011, 878 s. Gerstner. ISBN 978-80-200-2039-0.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE, Richard G BUDYNAS a Miloš VLK (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. V Brně: VUTUM, 2010, xxv, 1159 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

HÁJEK, J. Modelování s využitím CFD - I.Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce je v první části zaměřena na proudění kolem wingletu a jejich využití. Druhá část práce zpracovává přehled modelovými zkouškami, měřením rychlosti a vizualizací. Závěrečná část se zabývá reálným experimentem v aerodynamickém tunelu.

Klíčová slova

winglet, aerodynamický tunel, Kaplanova turbína, měření rychlosti, vizualizace

Abstract

The first part of this bachelor's thesis deals with the use of winglets and fluid flow around them. The second part provides a view of model experiments, anemometry and visualization of flow. The final section focuses on real experiment in aerodynamic tunnel.

Key words

winglet, aerodynamic tunnel, Kaplan turbine, anemometry, visualization

Bibliografická citace

GREŠÁKOVÁ, K. *Proudění kolem wingletu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fluidního inženýrství, 2016. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Sluše.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Proudění kolem wingletu** vypracoval(a) samostatně pod vedením Ing. Jana Sluše a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2016

Kristýna Grešáková

Poděkování

Děkuji tímto svému vedoucímu práce Ing. Janu Sluše za praktickou výpomoc při reálném experimentu, poskytnutí modelu lopatky a také za připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce.

Současně bych ráda poděkovala celému R&D týmu společnosti ADC Czech Republic, s.r.o. za podporu a cenné rady během studia, také za pomoc s tvorbou a výrobou modelu. Poděkování patří také pracovníkům hydraulické laboratoře Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana za úpravu modelu a rovněž instituci ČMI za možnost využití aerodynamického tunelu v jejích prostorech.

Ráda bych poděkovala i své rodině a příteli za podporu po celou dobu studia.

Obsah

Úvod	13
1 Winglety používané při proudění ve vzduchu	14
1.1 Použití wingletů na letadlech.....	14
1.1.1 Historie wingletu.....	14
1.1.2 Indukovaný odpor	16
1.2 Použití wingletů ve větrných elektrárnách	17
2 Winglety používané při proudění ve vodě	18
2.1 Použití wingletů v Kaplanově turbíně	18
2.1.1 Kavitace v Kaplanově turbíně.....	19
2.1.2 Využití wingletů	21
2.2 Použití wingletů na lodích	22
3 Modelové zkoušky.....	23
3.1 Podobnost proudění	23
3.1.1 Podobnost obecně	23
3.1.2 Hydraulická podobnost	25
3.2 Zkoušky v aerodynamickém tunelu.....	26
3.2.1 Rozdělení tunelů dle konstrukce.....	26
3.2.2 Rozdělení tunelů dle rychlosti	27
4 Způsoby měření rychlosti a charakteru proudu.....	28
4.1 Prandtlova a Pitotova trubice.....	28
4.2 Žárový anemometr (CTA)	29
4.3 Laser Doppler Anemometry (LDA)	29
4.4 Integrální laserová anemometrie (PIV)	31
5 Vizualizace proudění	32
5.1 Vizualizace širšího okolí.....	32
5.1.1 Kouř	32
5.1.2 Částice.....	33
5.1.3 Barvivo.....	34
5.2 Vizualizace na povrchu obtékaného objektu	34
5.2.1 Nitky	34
5.2.3 Povrchový olejový film	35

6 Konstrukční část	36
6.1 Návrh wingletu.....	36
6.2 Výroba modelu.....	37
6.3 Sestavení prvků experimentu.....	38
7 Experiment v aerodynamickém tunelu	39
7.1 Shoda s reálným dějem a předpoklady	39
7.2 Vizualizace.....	40
7.2.1 Olejový film	40
7.2.2 Nitě.....	42
7.2.3 Kouř	44
7.2.5 Vatové chomáče.....	45
7.2.6 Dlouhý provázek	46
7.2.7 Peří na niti	49
7.3 Měření	51
Závěr.....	52
Seznam použitých zdrojů	53
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	57
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek.....	61

Úvod

Na úvod své práce bych ráda uvedla úryvek z úvodu autora Brože [4]:

„Některé vlastnosti plynů a zákony ovládající jejich pohyb (zvláště při nižších rychlostech) lze se značnou přesností aplikovat i na kapaliny. Z tohoto důvodu se kapaliny a plyny obvykle řadí do jedné kategorie, zvané tekutiny.

Reakce na změny tvaru a objemu jsou u obou složek tvořících tekutiny různé. I když kapaliny nekladou odpor pomalým změnám tvaru, jejich odpor vůči změnám objemu je stále značný – kapaliny jsou téměř nestlačitelné. Plyny si nezachovávají žádnou z uvedených tendencí udržet původní stav – projevují se volnými změnami objemu a tvaru“

Tato práce se zabývá prouděním tekutin a zachycením probíhajících jevů. Charakter proudění tekutiny kolem segmentů stroje může výrazně ovlivnit jeho vlastnosti. Proto jsou mnohé výzkumy věnovány snižování odporu, tedy ovlivnění proudění. Výsledkem jednoho z výzkumů jsou právě winglety.

Funkce wingletu spočívá v posunutí a redukci víru, který vzniká vlivem přetékání tekutiny s vyšším tlakem do oblasti s tlakem nižším. Winglety jsou využívány na letadlech a větrných elektrárnách, tedy v případě obtékání plynem – vzduchem, ale také na vodních turbínách a lodích, v případě obtékání kapalinou – vodou.

Na počátku každé renovace probíhá patřičný výzkum, numerický či experimentální, v nejlepším případě obojí. Na jedné straně experimentálního výzkumu je technické provedení, přizpůsobivost daným podmínkám a s tím spjatá podobnost s reálným dějem. Na straně druhé však zůstává, jak zachytit či naměřit celý děj. Právě tím se zabývá tato práce, především měření rychlosti a vizualizací v aerodynamickém tunelu.

1 Winglety používané při proudění ve vzduchu

1.1 Použití wingletů na letadlech

V letectví jsou pod pojmem winglety označovány zahnuté konce křídel. Jejich účinek se projevuje redukcí tvorby vírů a tím vzniklého indukovaného odporu. Redukce indukovaného odporu se významně projevuje ve snížení spotřeby paliva. Díky snížení indukovaných vírů je možné, aby na jedné trati vzlétalo více letadel v kratším čase. [1]

Instalaci wingletu na konec křídla je zvýšen ohybový moment, který na křídlo působí. Z toho plyne nutná konstrukční úprava, která vyžaduje finanční investici. Proto jsou winglety využívány hlavně na komerčních letadlech. Uplatnění naleznou i na vojenských letadlech avšak v mnohem menší míře. Ve srovnání s dopravními letouny, vojenská letadla nevzlétávají tak často a regulérně, proto pro ně není použití wingletu z ekonomického hlediska výhodné. [1]

V následujících podkapitolách je zmíněn prvotní vývoj wingletů pro letadla a přiblížení problému, kterému předchází.

1.1.1 Historie wingletu

Mezi prvními, kdo se problematikou zabýval, byl anglický inženýr Frederick Lanchester kolem roku 1897. Jeho teoretická i experimentální studie odhalila, že vertikální prodloužení křídla, může velmi silně ovlivnit vztlak na konci křídla. Lanchester tedy navrhl a nechal patentovat prodloužení křídla zvané „endplates“. Lanchesterova teorie nikdy nebyla považována za efektivní, jelikož vzrůst profilového odporu převýšil zamýšlený přínos. [2, 3]

Následujícímu výzkumu se věnoval Elliott Reid roku 1922, jenž prokázal, že při nízkých součinitelích vztlaku:

$$c_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad [-] \quad (1)$$

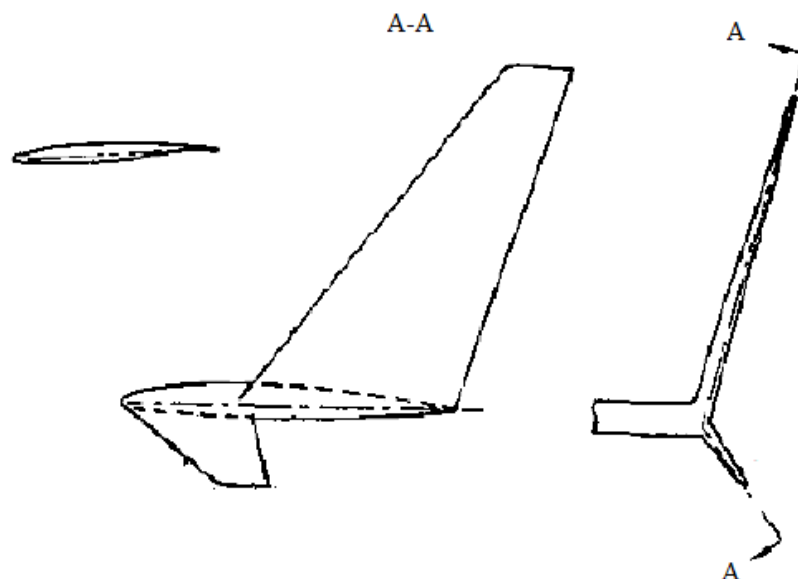
kde	L	vztlaková síla [N],
	ρ	hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
	v	skutečná rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
	S	plocha křídla [m^2].

vykazují modifikovaná křídla lehce horší charakteristiky než křídla rovná. Nicméně od hodnoty třech desetin maximálního součinitele vztlaku se charakteristiky zlepšují a při vyšších součinitelích se výrazně zredukuje indukovaný odpor. [2]

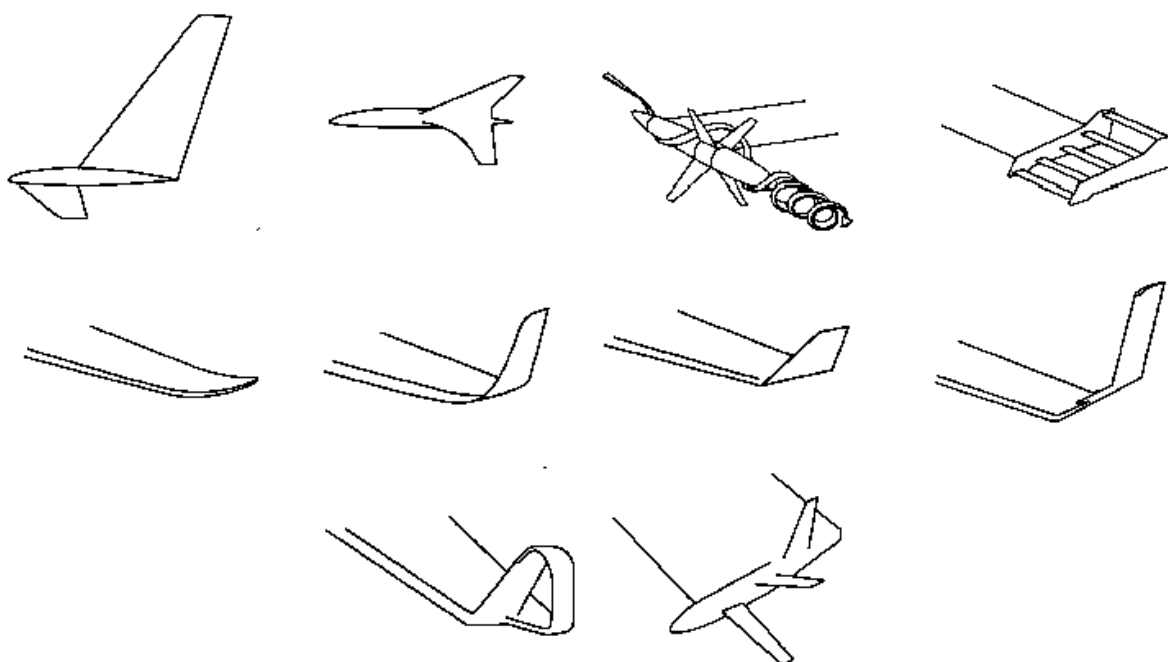
Po druhé světové válce, roku 1952 dokončil německý aeronautický inženýr Dr. Sighard Hoerner výzkum na sklopené zakončení křídel, která jsou známá jako „Hoerner tips“. Léta se používala na křídlech kluzáků, protože odrazovala víry z povrchu křídla a zvyšovala celkový poměr vztlaku k odporu. Přes dlouhodobý výzkum však tato zakončení křídel stále nebyla schválena z důvodu vytváření vysokého profilového odporu. [2]

V době energetické krize roku 1973 se k výzkumu vrátil americký aeronautický inženýr Richard T. Whitcomb pod záštitou NASA. Inspiroval se zakončením křídel ptáků se zájmem napodobit tyto tvary na křídlech letadla. Roku 1974 přišel s hypotézou, že dobře navržená skoro kolmá zakončení křídel opravdu redukuje sílu vírů. Po dlouhých letech výzkumu, teprve Whitcomb pojmenoval zakončení křídla názvem „Winglet“. [2]

Whitcomb navrhl winglet speciálně ke zvýšení Machova čísla. Testy z větrného tunelu prokázaly ohromné snížení indukovaného odporu skoro o 20 % a vzrůst poměru vztlaku k odporu kolem 9 %.[2]



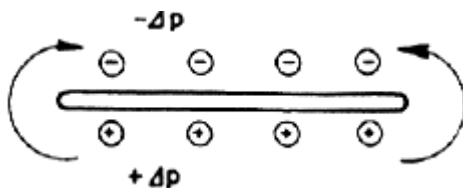
Obr. 1.1 Originální design navržený Whitcombem a jeho týmem [2]



Obr. 1.2 Používané nebo testované zakončení křídel [3]

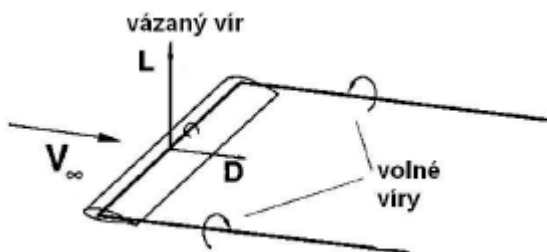
1.1.2 Indukovaný odpor

Při obtékání křídla dochází ke změně rozložení tlaku. Na horní ploše se tvoří podtlak a pod spodní plochou přetlak, čímž dojde k vytvoření vztlakové síly. Křídla jsou konečného rozpětí. Z toho důvodu dochází k vyrovnání tlaků prouděním přes vnější hranu. Tím se na koncích křídel tvoří víry, které jsou experimentálně dobře zpozorovatelné. Jev je známý pod pojmem indukované proudění.

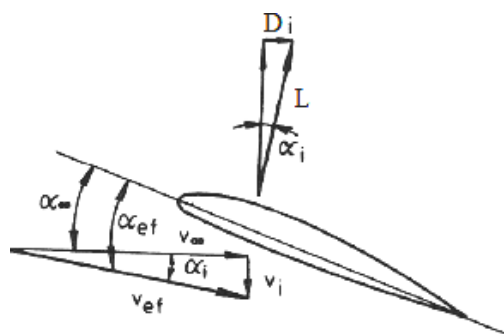


Obr. 1.3 Znárodnění indukovaného odporu [4]

Nejjednodušší vírové schéma křídla konečného rozpětí je představováno jedním vázaným vírovým vláknem o konstantní intenzitě a dvěma volnými víry sbíhajícími z konců křídla, vlákna za křídlem směřují do nekonečna (k „hranicím“ tekutiny). Tento model je často označován jako podkovitý vír.



Obr. 1.4 Vírový model křídla [5]



Obr. 1.5 Rozložení rychlostí, úhlů a sil [5]

Indukovanou rychlost určuje smysl cirkulace volných vírů na konci křídla – viz obrázek 1.5. Vektor indukované rychlosti snižuje hodnotu úhlu náběhu profilu na efektivní úhel náběhu. Změna rychlosti na rychlost efektivní vede k nežádoucímu naklonění vztlakové síly L do směru kolmého na „ v_{ef} “. Při rozkladu vztlakové síly vznikne reakční síla D_i ve směru kolmém na původní. Tato síla se nazývá indukovaný odpor. [4, 5, 6]

Základní způsob, kterým snížíme indukovaný odpor je zvýšení štíhlosti křídla λ , která je určena v závislosti druhé mocniny délky L k obsahu plochy křídla S .

$$\lambda = \frac{L^2}{S} \quad [-] \quad (2)$$

Indukovaný odpor nabývá nejvyšších hodnot při vzletu a přistávání, tedy při vysokých součinitelích vztlaku. Tuto závislost popisuje rovnice součinitele indukovaného odporu:

$$c_{Di} = \frac{c_L^2}{\pi \cdot \lambda} \cdot (1 - \delta) \quad [-] \quad (3)$$

kde c_L součinitel vztlaku [-],
 π Ludolfovo číslo
 λ štíhlost křídla [-],
 δ Glauertův opravný součinitel¹ [-].

1.2 Použití wingletů ve větrných elektrárnách

Na větrných elektrárnách jsou winglety využívány z obdobného důvodu jako u letadel. Velké elektrárny bývají startovány pomocí motoru, kdežto malé elektrárny jsou často roztáčeny pouze větrným působením. V experimentální studii [7] je prokázáno, že v případě použití wingletu jsou potřeba nižší rychlosti větru ke startu turbíny, což je pro malé větrné elektrárny velká výhoda. Také řeší problém hlukových emisí větrných elektráren snížením vírových formací na konci lopatek. Winglety jsou umístěny na konec sací strany lopatky, snižují celkový odpor lopatky a zvyšují výkon turbíny. [2, 7, 8]

Geometrie wingletu pro větrné turbíny je podobná těm, které jsou využívány v letectví. Čím je vyšší nebo více zahnutý, silový účinek se zvyšuje. [8, 9]



Obr. 1.6 Zmenšená větrná turbína s winglety [9]

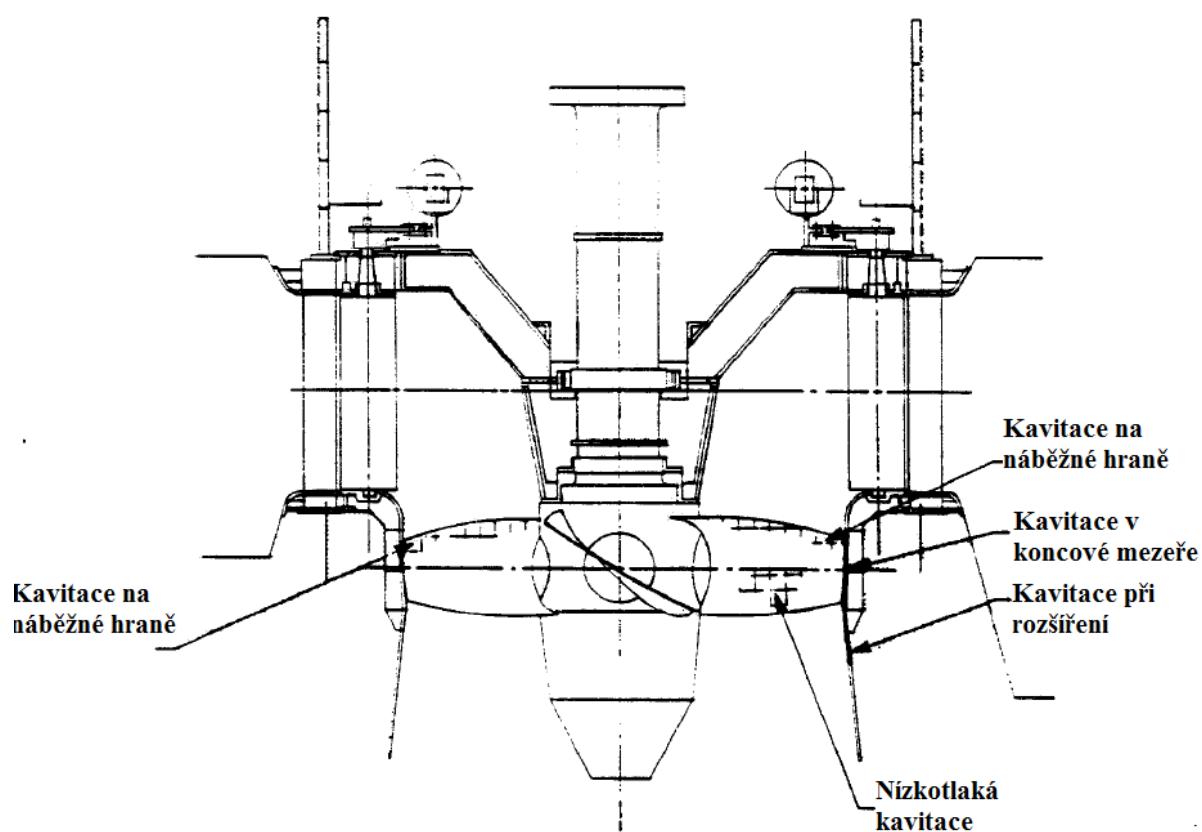
¹ Podrobně popsáno a rozebráno v bakalářské práci autora Kubíčka [37].

2 Winglety používané při proudění ve vodě

2.1 Použití wingletů v Kaplanově turbíně

Winglety, jinak zvané anti-kavitační okraje² se u Kaplanovy turbíny (KT) využívají na konci oběžných lopatek. KT je axiální, rychloběžná, přetlaková turbína, která je náchylná na kavitaci vzniklou v koncových vírech. Použitím anti-kavitačních okrajů jsou víry vzniklé v koncové mezeře odvráceny od povrchu lopatky i stěn turbíny.

V následujících podkapitolách jsou blíže popsány problémy, se kterými se KT potýkají a princip využití okrajů.



Obr. 2.1 Typické oblasti výskytu kavitační eroze Kaplanovy turbíny [10]

² Anticavitation lip

2.1.1 Kavítace v Kaplanově turbíně

Kavítace je termín, který v sobě zahrnuje nukleaci, růst a zánik bublin s vodní párou. Děj se odehrává za konstantní teploty kapaliny při poklesu tlaku na tlak nasycených par. Celý proces vzniku a zániku bublinek trvá v řádu nanosekund a projevuje se ve vysoké amplitudě šokových vln. Amplituda výsledného tlaku v blízkosti povrchu může být vyšší než mechanická pevnost materiálu. Naakumuluje-li se působení na povrchu, materiál se unaví a poškodí. Vytvoří se důlky nebo vruby v řádu mikrometru nazývané „pitting“. Vytvořením kavitační eroze klesá výkon turbíny.

Kavítace se projevuje ve více podobách. V okolí lopatky se vyskytují kavítace ve formě bublin a bublinových skupin tvořících souvislou plochu, kavitačních mraků, a různých formách vírové kavítace. Vzhledem k zaměření práce jsou níže zmíněny pouze některé z nich.[12, 14, 15, 16]

○ Kavítace koncové mezery

Nastává v mezeře mezi lopatkou a stěnou turbíny. Tlakový rozdíl mezi sací a tlakovou stranou lopatky způsobuje, že skrze mezeru proudí tekutina. Z důvodu úzké mezery je proud urychlen a tlak snížen. V případě, že se tlak sníží na tlak nasycených par, nastane kavítace. Kavítace koncové mezery obvykle nastává jako první forma. [12]



Obr. 2.2 Kavítace v koncové mezeře [12]

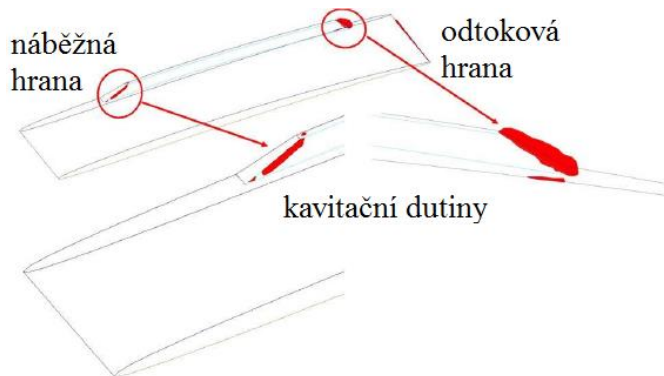
- Kavítace koncových vírů

Jakmile proud koncové mezery opustí její prostor, vytvoří se vír. Koncový vír nastává na okraji lopatky nedaleko od náběžné hrany, odtrhne se od povrchu na sací straně a pokračuje po směru proudu kolem lopatky. Vír má po své délce třepetavý (vlnivý tvar). Vlnění se periodicky opakuje a vytváří tak kavitační opotřebení jen v určitých místech. V experimentálním pokusu³ [17] bylo poukázáno, že periodicitu závisí na rozdělení a počtu rozvodných lopatek. Místa dotyku jsou náchylná na kavitační erozi. [12, 13, 17]



Obr. 2.3 Doteč koncového víru [12]

V [36] byl proveden numerický výpočet a zhodnocen výsledek rozdílných průřezů anti-kavitačních okrajů. Autoři uvádí, že použitím anti-kavitačního okraje nastávají tzv. kavitační dutiny – víry, které se objevují v „extrémních“. Modifikací průřezu a zaoblením ostrých přechodů je možno víry ovlivnit.

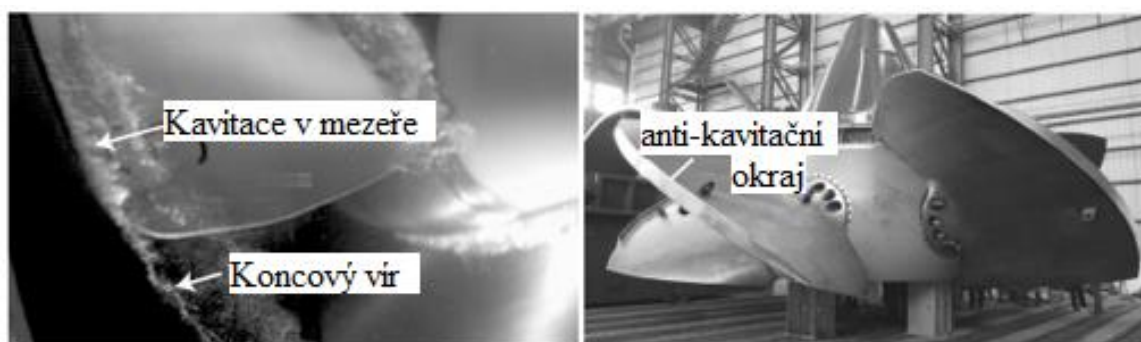


Obr. 2.4 Kavitační dutiny [36]

³ Experiment byl s obdobným výsledkem propočten v CFD softwaru [16]

2.1.2 Využití wingletů

Mezerou mezi lopatkami a stěnou turbíny proudí ztrátový proud. Tento proud je následován snížením lokálního tlaku v mezeře a vírovými formacemi. Poklesem tlaku ve středu víru na tlak nasycení vodních par, nastane kavitace. Kavitační eroze závisí na tvaru víru a poloze vůči lopatce a stěně turbíny. Tento typ kavitace nesouvisí s kavitačním součinitelem turbíny⁴, proto je potřeba jej zvážit samostatně.



Obr. 2.5 Kaplanova turbína a problematická kavitace [11]

Velmi často je problém řešen renovací turbíny – instalací anti-kavitačních okrajů. Kavitaci ovlivňuje také změna geometrie profilu lopatky nebo zmenšení koncové mezery na technologické minimum. Vznik kavitace v koncové mezeře je předpokladatelný, i když jsou lopatky turbíny vhodně navrženy. Funkce okrajů spočívá v natočení středu víru dál od povrchu lopatky. Při volbě nevhodných rozměrů se může renovace minout s účinkem. Dobře navržený anti-kavitační okraj by neměl významně ovlivnit výkon turbíny. Obvykle změna ovlivní výkon v rozmezí 0,1-0,2 %. Efekt je evidentní dle obrázku 2.6, vír je natočen a intenzita víru znatelně zredukována. [10, 11, 12, 13]



Obr. 2.6 Průběh kavitace v koncové mezeře bez a s použitím anti-kavitačního okraje [13]

⁴ Kavitační součinitel – bezrozměrné číslo, které popisuje stav proudící kapaliny. Hodnota faktoru je srovnána s kritickým faktorem σ_k , pro který je turbína navržena. Součinitel je individuální pro typ HS a udává jej rovnice:

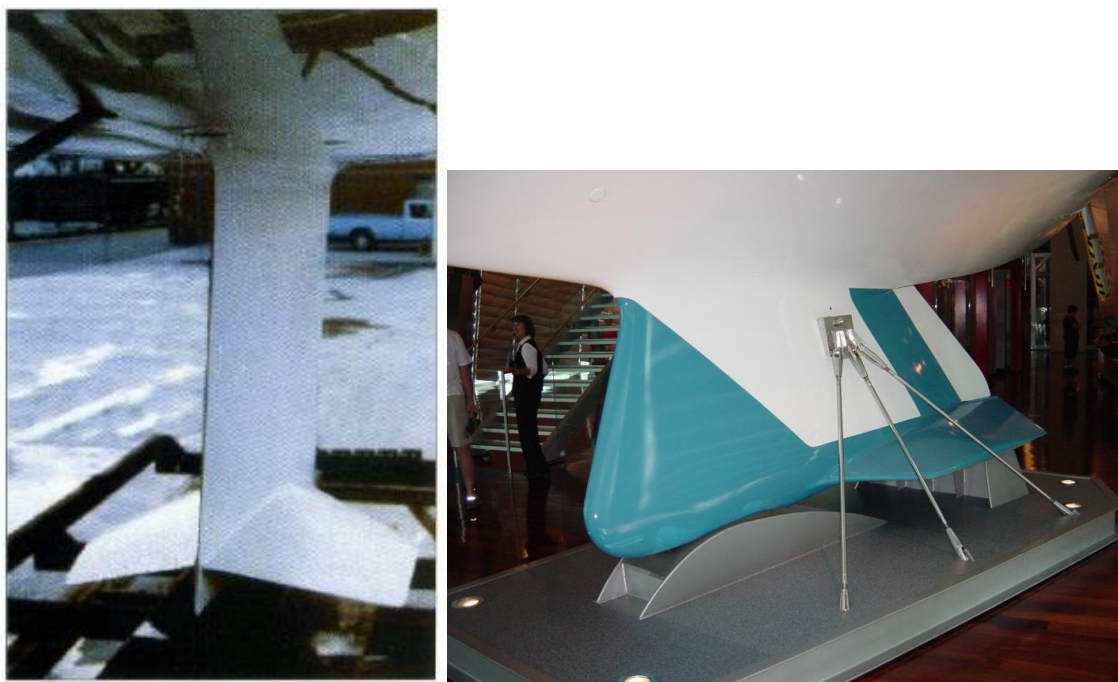
$$\sigma = \frac{(p_0 - p_c)}{\frac{1}{2} \rho v_0^2},$$

p_0 – tlak proudu [Pa], v_0 – rychlost proudu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], ρ – hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], p_c – kritický či kavitační tlak [Pa]

2.2 Použití wingletů na lodích

V lodním průmyslu se winglety vyskytují zejména u větších jacht. Roku 1983 je použil australský jachtař Alan Bond při konstrukci závodní jachty. Jeho loď vyhrála Americký pohár a tím porazil dlouholetého Amerického výherce. V dnešní době je na některých závodech renovace v podobě wingletu zakázána.

Winglety bývají umístěny na konci kýlu z obou stran. Nabývají obvyklého štíhlostního poměru jako u letadel. Slouží k redukci odporu, zlepšení působení bočních sil a vlastností plachtění po větru. Zajišťují lepší stabilitu lodě. [2, 18, 19]



Obr. 2.6 Winglet na kýlu lodí (Islander 34 vlevo [20], Australia II vpravo [19])

3 Modelové zkoušky

Experiment je nedílnou součástí výzkumu. Někdy není možné daný děj přesně matematicky popsat. K vyřešení rovnic se některá data zanedbávají a idealizují. Proto je experimentálními metodami možno problémy vyřešit. V mnoha případech však nelze použít k experimentu skutečné zařízení, tzv. prototyp. Z tohoto důvodu bývá zhotoven model, který je méně nákladný nebo splňuje rozměrová kritéria testovací stanice.

Získané výsledky na modelu se následně přepočítávají dle podobnostních charakteristik na prototyp. V následujících podkapitolách jsou popsány základy podobnosti, které se využívají v obecném případě a hydraulická podobnost, jenž je nezbytná pro zkoušky turbín a hydraulických strojů. Dále je popsáno stručné rozdělení aerodynamických tunelů. [21]

3.1 Podobnost proudění

Model určený ke zkoušce musí splňovat jisté předpoklady, aby zkouška vydala odpovídající výsledek. Model musí podléhat geometrické, kinematické a dynamické podobnosti.

Plnění geometrické podobnosti znamená, že by měly být všechny rozměry modelu v měřítku vůči rozměrům prototypu. Geometrická podobnost zahrnuje také dodržení třecích hydraulických ztrát, tzn. drsnosti povrchu.

Podobnost kinematická udává, že rychlosti zkoušené na modelu musí být v měřítku vůči rychlostem postihující prototyp. V oboru hydraulických strojů to znamená dodržení podobnosti rychlostních trojúhelníků.

Posledním předpokladem je dynamická podobnost, jenž zahrnuje poměr hlavních sil působících na model a reálný objekt. [6, 21, 22]

3.1.1 Podobnost obecně

Podobnost geometrická a kinematická je obvykle relativně snadno splnitelná. Potíže udává dynamická podobnost. Proto jsou zavedena tzv. podobnostní čísla, která dávají silové působení do závislosti.

Nejčastěji řešený problém nastává v případě vazké tekutiny, nestlačitelné a bez vlivu tíhové síly. Sledované objekty by měly mít stejnou hodnotu Reynoldsova čísla (Re).

Re číslo je bezrozměrná veličina vyjadřující poměr setrvačných a třecích sil. Zvyšováním Re čísla se snižuje vliv třecích sil a zvyšuje se vliv sil setrvačných. Charakterizuje vliv vnitřního tření tekutiny.

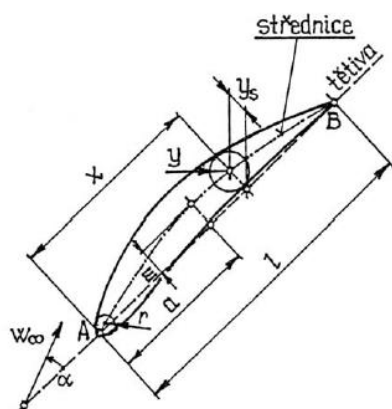
Hodnota Re čísla udává, zda se jedná o laminární či turbulentní proudění. Je-li hodnota proudění v kruhovém potrubí $Re > 2320$, proudění přechází přes přechodovou oblast do proudění turbulentního. [22]

Koncem 19. století prováděl Osborn Reylolds experimenty, ve kterých zkoumal chování tekutiny proudící skrze potrubí kruhového průřezu. Klíčovou závislost bezrozměrného rychlostního parametru definoval:

$$Re = \frac{wD}{\nu} \quad [-] \quad (4)$$

kde w relativní rychlost tělesa vzhledem k tekutině v neovlivněné vzdálenosti, v potrubí průměrná rychlost média na průřezu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 ν kinematická viskozita média [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$],
 D charakteristický rozměr, u letadel délka tělivity a v potrubí dán plochou průřezu S a omočeným obvodem O

$$D = \frac{4S}{O} \quad [\text{m}]. \quad (5)$$



Obr. 3.1 Znázornění střednice a tětivy profilu [21]

V praxi se využívají i jiná podobnostní čísla, avšak není možné získat shody všech. Proto je důležité zvážit důležitost pro daný případ. Níže jsou uvedena některá z nich.⁵ [6, 21, 22]

Machovo číslo kompresní a setrvačná síla
 Froudeovo číslo tíhová a setrvačná síla
 Weberovo číslo..... kapilární a setrvačná síla
 Eulerovo číslo..... tlaková a setrvačná síla
 Strouhalovo číslo..... hybnostní a setrvačná síla

⁵ Odvození a podrobnější přehled je ve skriptech Hydromechaniky [21, s.222]

3.1.2 Hydraulická podobnost

V oboru hydraulických strojů (HS) není zachování Re čísla stěžejní. Neshodu je lze tolerovat, jelikož v HS dochází většinou k třetímu režimu turbulentního proudění, kde ztráty třením nejsou závislé na Re. [21]

Důležitější parametr činí Froudeovo číslo, jenž je pro HS definováno:

$$Fr = \frac{u^2}{gH} \quad [-] \quad (6)$$

kde u absolutní výslednou rychlost proudu v turbíně [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 g gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
 H charakteristický rozměr, v našem případě spád [m].

Charakteristiky daného HS se většinou graficky znázorňují a dané parametry jsou platné pro hydraulicky podobné HS. Zápis⁶ je prováděn ve formě jednotkových parametrů a charakteristických koeficientů. [21, 23]

Jednotkový průtok odpovídá zároveň Eulerovu číslu:

$$Eu = \frac{Q}{D^2\sqrt{E}} \quad [-] \quad (7)$$

kde Q průtok [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$],
 D charakteristický rozměr [m],
 E měrná energie HS [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$].

Jednotkové otáčky číslu Strouhalovu:

$$Sh = \frac{nD}{\sqrt{E}} \quad [-] \quad (8)$$

kde n otáčky [s^{-1}].

Charakteristické koeficienty tvoří energetický, průtokový, momentový a výkonový.

⁶ Podrobněji popsáno a vysvětleno ve skriptech Hydromechaniky [21, s229]

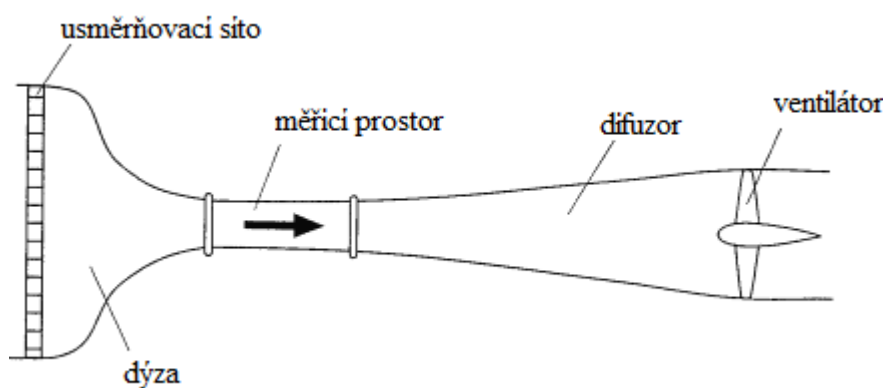
3.2 Zkoušky v aerodynamickém tunelu

Aerodynamický tunel je zařízení, ve kterém proudí vzduch poháněný ventilátorem či kompresorem. Vektory rychlosti vzduchu jsou rovnoběžné s osou potrubí a proudí zvolenou rychlostí. Tunely rozlišujeme dle konstrukce a rychlosti tunelu což je rozebráno v následující podkapitole.

Aerodynamické tunely byly v minulosti využívány především v letectví. Uplatnily se také v automobilním průmyslu a vnitřní aerodynamice odstředivých strojů jako například vodních turbín, odstředivých čerpadel nebo turbokompresorů. Výsledky získané v tunelech jsou využívány i pro obtékání budov, mostů apod. Přispívají také k řešení úloh ve sportu zejména cyklistiky, sjezdovém lyžování nebo i obtékání golfového míčku. [24]

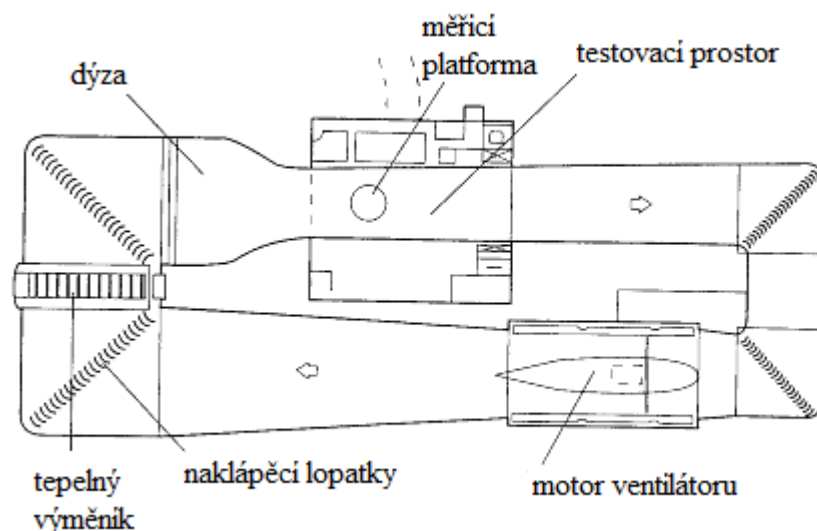
3.2.1 Rozdělení tunelů dle konstrukce

Aerodynamické tunely dělíme dle konstrukce na tunely s uzavřeným a otevřeným oběhem. Oba typy oběhu dále dělíme na tunel s otevřeným nebo uzavřeným testovacím prostorem. Na obrázku 3.2 je zobrazen aerodynamický tunel s otevřeným okruhem a uzavřeným testovacím prostorem. Model je upevněn v testovacího prostoru a na něj je spuštěn proud vzduchu. Za konstantní hustoty vzduchu se v nejužším průřezu zvýší rychlost proudu. Výsledky získané v tunelu s otevřeným oběhem i s otevřeným testovacím prostorem jsou snadno ovlivnitelné okolním prostředím. Hluk vytvořený ventilátorem, či pohonnými jednotkami nelze snadno izolovat. Otevřená konstrukce vyžaduje také vyšší pohon než konstrukce zcela uzavřená. [25]



Obr. 3.2 Schéma otevřeného tunelu s uzavřeným testovacím prostorem [25]

Výsledky získané ve zcela uzavřeném tunelu jsou přesnější a je možné provádět zkoušky při jiných tlacích a tím zvýšit Re číslo, tzn. při téže výkonnosti poháněcího motoru. [24] Uzavřená konstrukce tunelu je však mnohem nákladnější a náročnější na údržbu. Zanáší se prostředky použitými pro vizualizaci (například kouř). Při dlouhém testování vznikají v tunelu vysoké teploty, kterým je předcházeno tepelnými výměníky. [25]



Obr. 3.3 Aerodynamický tunel s uzavřeným oběhem [25]

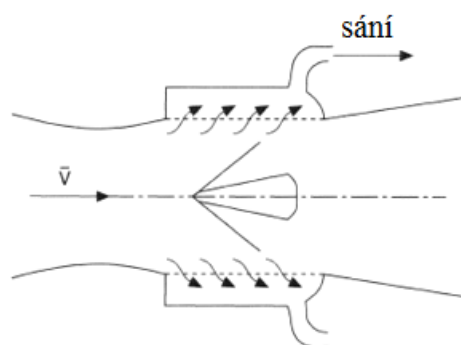
3.2.2 Rozdělení tunelů dle rychlosti

Aerodynamické tunely jsou děleny dle přípustné rychlosti proudu, které lze v daném tunelu docílit. Tunely se dělí na nízkorychlostní, vysokorychlostní, podzvukové a nadzvukové. Tunely, ve kterých je možné dosáhnout nadzvukové rychlosti, se dále dělí na supersonické, hypersonické a transsonické, kde se proudění pohybuje v číslech $Ma \geq 1$.

Podzvukové (subsonické), nízkorychlostní zkoušky probíhají pro běžný průmysl nejčastěji, ve většině případů pouze pro kontrolu shody s výpočtovými modely. Rychlost proudu je nízká a neprojevují se vlivy stlačitelnosti.

Supersonické a hypersonické (nadzvukové) zkoušky jsou převážně prováděny pro modely leteckého průmyslu. Tyto zkoušky je nutno provádět s přerušovaným chodem, protože jsou velmi náročné na výkonnost zařízení. Využívá se energie naakumulované stlačením vzduchu do přetlakové nádrže.

Transsonické zkoušky probíhají pro modely, kde se očekává překročení rychlosti zvuku. I kdyby rychlost zvuku byla překročena jen lokálně. Jelikož se v oblasti transsonických rychlostí pohybujeme v blízkosti $Ma_\infty = 1$, výsledky zkoušek často selhávají. Vytvoří se rázová vlna, která by mohla zasáhnout stěny měřicího prostoru a tím jej „ucpat“. Odražená vlna od stěny by mohla zasáhnout model a znehodnotit výsledky měření. Na obrázku 3.4 je znázorněna část tunelu, jenž bývá využíván k umírnění rázové vlny. [24, 26]



br. 3.4 Úprava tunelu zamezující odraz vlny [26]

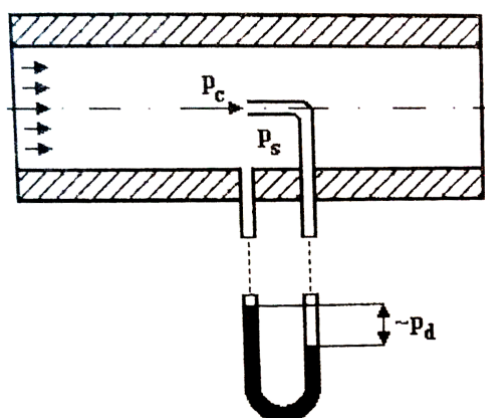
4 Způsoby měření rychlosti a charakteru proudu

Zkoušky v aerodynamickém nebo hydraulickém tunelu probíhají k získání charakteristik proudu a silového působení na dílo. V následujících podkapitolách jsou zmíněny metody měření rychlosti. Metody jsou seřazeny dle vývoje technologie v čase.

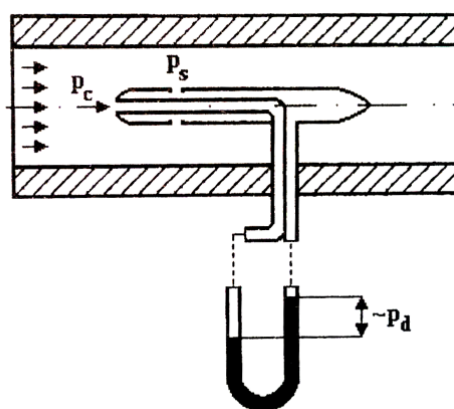
4.1 Prandtlova a Pitotova trubice

Nejstarší metodou měření rychlosti proudu je pomocí Pitotovy trubice. Měření Prandtlovou trubicí je založeno na podobném principu, avšak je výrobně složitější a přesnější. Jedná se o dynamické rychlostní sondy. Měří rozdíl mezi tlakem nerušeného proudu a proudem, který je zastaven na vstupním otvoru trubice. Princip vychází ze závislosti vyjádřené z Bernoulliho rovnice:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gh = konst. \quad (9)$$



Obr. 4.1 Pitotova trubice [46.27]



Obr. 4.2 Prandtlova trubice [46.27]

Tlak nerušeného proudu je roven tlaku volné atmosféry. Tuto hodnotu zaznamenává otvor p_s (statický tlak). Otvor p_c (celkový tlak) je určen k měření tlaku zastaveného proudu. Proud je zastaven a hodnota tlaku ve volné atmosféře je tím navýšena o dynamický tlak.

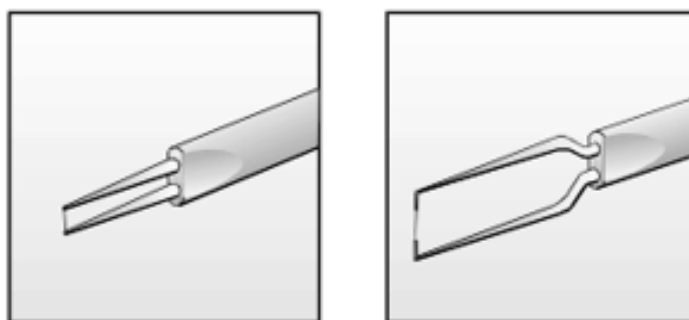
Hodnota hustoty vzduchu, rozdílu tlaku a rychlosti v místě otvoru p_c je známá. Rychlost proudu v případě Prandtlovy trubice lze vypočítat následně:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

Na trubici je zabudována stupnice v jednotkách rychlosti odpovídající naměřenému rozdílu tlaku (pro hodnotu hustoty vzduchu za normálních podmínek). Ačkoli je měření v celku jednoduché, trubice musí být během měření ponořena proti směru měřeného proudu. V měření malých průřezů tak může dojít porušení proudu a tím znehodnocení výsledků. Výsledky jsou citlivé na natočení trubice vůči směru rychlosti. [21, 22, 27]

4.2 Žárový anemometr (CTA)

Princip metody využívá poznatku, že prouděním kapaliny kolem žhaveného čidla dochází k odvedení tepla. Teplo odvedené konvekční proudou je rovno množství tepla, které je nutné čidlu dodat pomocí elektrického proudu. Teplota čidla je udržována na konstantní hodnotě. Rychlost kapaliny je úměrná změně napětí nebo proudu. Výsledky jsou vyhodnocovány pomocí počítače. Čidla obvykle bývají – drátek⁷, dva různoběžné drátky, žhavená fólie nebo žhavená kulička.



Obr. 4.3 Žárový anemometr [22,28]

Měření žhaveným drátkem se používá hlavně díky rychlé odezvě. Tím je umožněno měření vysokorychlostního nebo vířivého proudění. Díky malé velikosti drátku je možné změřit charakteristiky i v mezní vrstvě. Na druhou stranu je měření náročné na čas i trpělivost. Drátek je citlivý na nečistoty, které znehodnocují měření. Pro kontrolu, zda během měření nenastala chyba, je potřeba měřidlo kalibrovat před i po měření. [28, 29]

Měření pomocí CTA probíhá v rozmezí rychlostí $0,001 - 100 \text{ m.s}^{-1}$, ale i vyšší.⁸

4.3 Laser Doppler Anemometry (LDA)

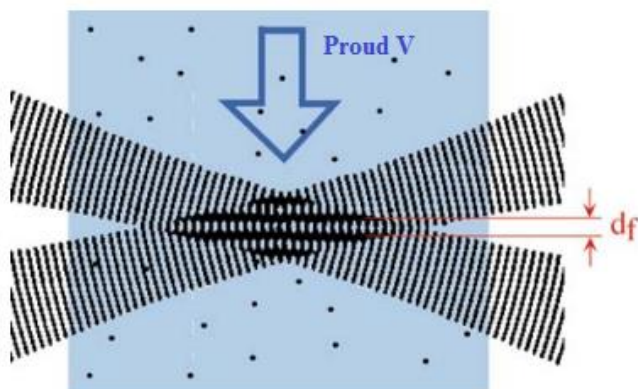
Princip metody LDA spočívá v laserovém ozáření mikroskopických částic unášených proudem a následným zpracováním změny frekvence záření, která je způsobena odrazem paprsku z povrchu částic.

Měření probíhá za pomoci laseru rozděleného do dvou menších paprsků stejné intenzity. Paprsky se kříží v jednom bodě, který je nazýván optická sonda. Optická sonda⁹ má tvar protáhlého elipsoidu a její velikost závisí na úhlu mezi paprsky a jejich průměru. Čím menší průřez tím větší intenzita záření. Rozložení intenzity má v příčném průřezu optické sondy Gaussovo rozdělení. [30, 31]

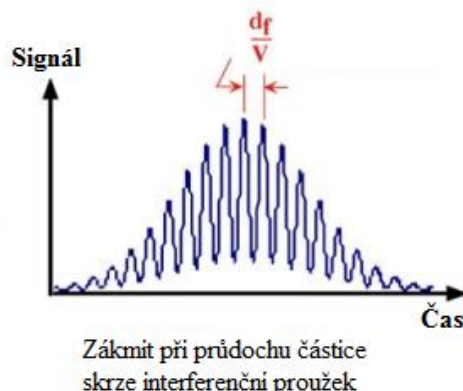
⁷ z platiny, niklu, wolframu obvykle o průměru $0,01 - 0,1 \text{ mm}$, délky $1 - 10 \text{ mm}$ a s časovou konstantou $0,1 \text{ s}$

⁸ Podrobný princip metody je popsán ve skriptech Experimentálních metod techniky prostředí [27]

⁹ Rozměry sondy se pohybují v desetinách až jednotkách milimetru [28]

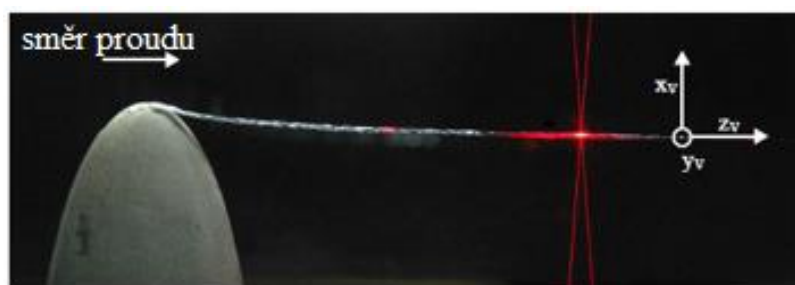


Obr. 4.4 Optická sonda [30]



Obr. 4.5 Dopplerovský vzrýv [30]

Překrytím koherentních lineárně polarizovaných paprsků se vytvoří tzv. interferenční proužky (obrázek 5.4). Tento jev je označován jako heterodynní detekce. Vlny způsobené odrazem z povrchu částice vytváří tzv. dopplerovský zákmit. Ten se vytváří ve chvíli, kdy částice projde interferenčním proužkem s vyšší nebo nižší intenzitou. Celková křivka intenzity signálu v závislosti na čase se nazývá Dopplerovský vzrýv. [31]



Obr. 4.6 Měření metodou LDA [11]

Metoda LDA využívá jednosložkového nebo vícetrožkového systému. Jednosložkový systém měří složku rychlosti pouze v jednom směru. To znamená, že k získání více složek rychlosti je nutné natočit laserový objekt o 90° . Vícetrožkové systémy jsou složeny z více sond v jednom anemometru a každý směr je rozlišen určitou vlastností¹⁰.

Měření LDA je získána pouze hodnota složky rychlosti. Problém určení směru rychlosti (kladný nebo záporný) je řešen pomocí Braggovy cely¹¹. Cella je umístěna do dráhy jednoho z dvojice paprsků a vytváří frekvenční posuv. Frekvenční posuv jednoho z paprsků tedy způsobí, že se interferenční proužky začnou ubíhat konstantní rychlostí. Částice pohybující se proti pohybu proužků bude produkovat dopplerovský vzrýv o vyšší intenzitě než částice letící stejnou rychlostí, ale ve směru ubíhání interferenčních proužků.

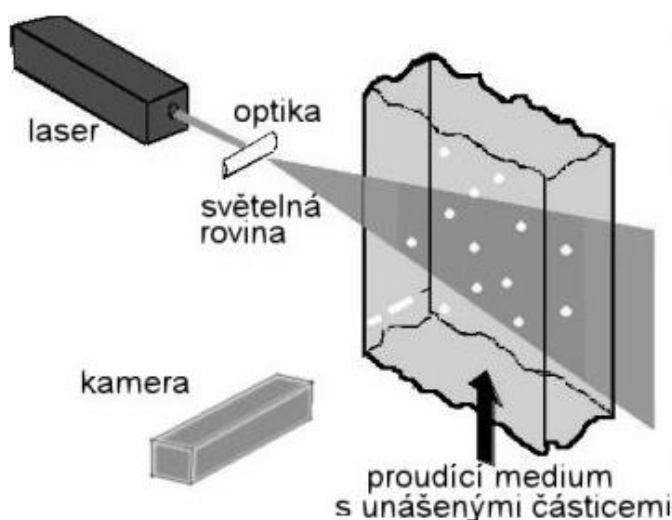
¹⁰ barva laserového paprsku, polarizace či změna frekvence

¹¹ Funkce Braggovy cely je podrobně popsána v knize autora Kopeckého [31]

Podmínkou měření rychlosti tekutiny LDA je, aby byly v tekutině malé částice¹², od kterých je světlo rozptýleno. V některých případech je možné měřit pouze za pomoci přirozených nečistot v daném médiu. Měřeny jsou pouze ty, které procházejí optickou sondou. K určení charakteru celého zkoumaného prostoru je potřeba naměřit hodnoty na více místech. Signál získaný z rozptýlení světla je zachycen fotodetektozem a dále zpracován procesorem. [27, 30]

4.4 Integrální laserová anemometrie (PIV)

Princip metody PIV (Particle Image Velocimetry) spočívá ve vizualizaci proudění částic¹³ v tekutině. Na rozdíl od metody LDA je možné zaznamenat rychlosti v rozsáhlé oblasti. Částice jsou ozářeny laserem a následně zachyceny vysokorychlostní kamerou několika snímky. Na snímcích se počítačově porovnává poloha částic a ze vzdálenostní difference se určuje rychlost a charakter proudění. Systém analyzuje částice, které jsou pomocí laseru ozářeny rovinným řezem. Světelná rovina je buzena pulzně, to z důvodu, aby bylo dosaženo stroboskopického jevu („zmrazení“). Impulsní prodleva je použita jako doba pro výpočet rychlosti. Měření je velmi přesné a vhodné i pro nestabilní proudění. Chybu měření činí zhruba 3-5 %. [32, 33]



Obr. 4.7 Měření metodou PIV [33]

¹² LDA – velikosti částic se pohybují v rozmezí několika desetin až po desítky mikrometrů [31]

¹³ PIV – velikost částic se pohybuje mezi 0.1-20 μm [33]

5 Vizualizace proudění

Vizualizace proudu se využívá již od dob, kdy začaly první experimentální pokusy s prouděním. Způsoby vysvětlenými v tomto dokumentu je možné získat relativně přesný průběh pohybu média v okolí obtékaného objektu. Zejména je umožněno zpozorovat za normálních okolností neviditelné jevy jako například víry, vzdálenost proudu od povrchu, charakter mezní vrstvy a separaci proudu. Výsledky experimentu by měly být porovnatelné s výpočtovými modely.

V průběhu vývoje vizualizace se do experimentálních pokusů zapojily i novější technologie. Zvýraznění proudu je možné pomocí přidaných částic, optických metod¹⁴ nebo speciálních metod, které využívají například nátěru citlivého na teplo nebo tlak. Následující podkapitoly jsou věnovány především vizualizaci za použití přidaných částic. Metoda PIV, jenž se také řadí k vizualizačním technikám, již byla zmíněna v předchozí kapitole pro měření rychlosti proudu.

Způsob aplikace se dělí na vizualizaci na samotném povrchu obtékaného objektu nebo v širším okolí. Zvýraznění proudu na povrchu tělesa probíhá za použití olejů, barviv a vlněných nitek. Průběh je závislý v čase a udává charakteristiky mezní vrstvy, přechodu, separace apod. V tomto případě je třeba zdůraznit, že děj na povrchu tělesa neudává co se děje ve volném proudu. Vizualizace v širším okolí probíhá za pomoci například heliových nebo mýdlových bublinek, kouře nebo barvy. Vše je podrobněji rozebráno v následujících podkapitolách. [32, 34]

5.1 Vizualizace širšího okolí

Vizualizace proudění v širším okolí modelu využívá především stopových prvků. Za stopový prvek je považována částice, kterou unáší proud. Kontrast prvku s okolním prostředím umožňuje pozorovateli posoudit strukturu proudu. Každá metoda vyžaduje patřičné osvětlení.

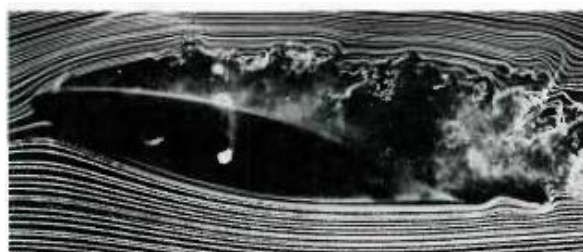
5.1.1 Kouř

Kouř je stopovým prvkem, který se využívá od již počátku vizualizace. Vizualizuje především proud, který je v okolí obtékaného objektu. Používá se pro detekci vírů a separace proudu. Využití se osvědčilo spíše pro subsonické aerodynamické tunely s nízkou vstupní turbulencí.

Kouř je tvořen v kouřových generátorech a přiveden v malých tryskách umístěných před testovaným objektem nebo skrze otvory na povrchu objektu. Vzniká odpařováním minerálního oleje (parafín, petrolej), mlhou vzniklou výparem látek (s obsahem bromidu, chloridu) nebo pochází z hořícího popřípadě doutnajícího dřeva, papíru či tabáku.

Použití kouře je podmíněno tím, že musí mít hustou strukturu (celistvý). Z důvodu kvalitní viditelnosti by měl být bílý a netoxický (nekorozivní). [32, 34]

¹⁴ Například: laseru - Particle Image Velocimetry
diody - Schlieren metoda, ...

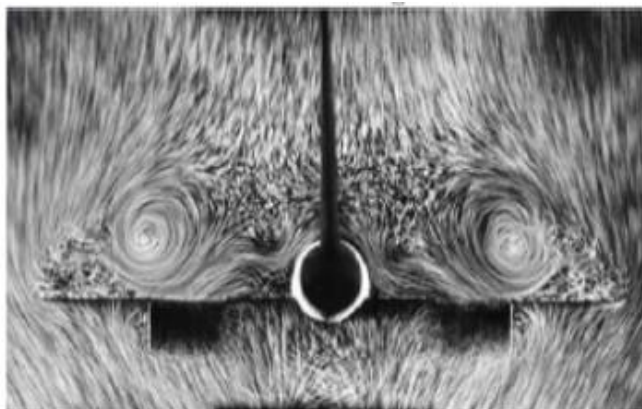


Obr. 5.1 Vizualizace kouřem leteckého profilu [35]

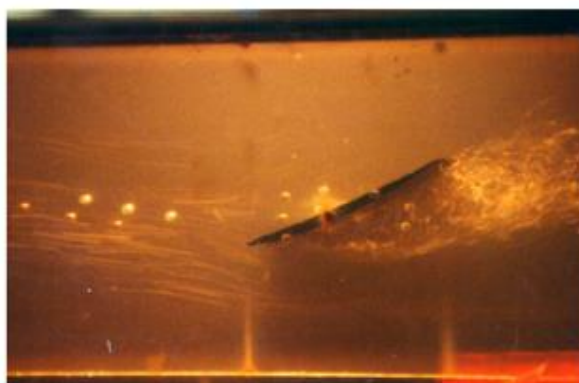
5.1.2 Částice

Částice mohou být pevné, plynné i kapaln¹⁵. Druh částic je vybírán s ohledem na velikost (čím menší, tím lepší), nekorozivost a reflexivitu. Pro správné provedení experimentu je nutné, aby částice měly stejnou rychlost jako unášivý proud. Proto není tato metoda účinná pro vysoké rychlosti a tekutiny, které jsou stlačitelné. V momentě šíření rázových vln nejsou částice schopny okamžitě následovat proud tekutiny. Měření by v tomto případě bylo nepřesné. [32]

Plynové bublinky během pohybu mění svůj tvar vlivem vnějšího působení. Bublinky jsou vstříkovány do proudu, nebo generovány elektrolýzou. Čas měření je limitován rozpadem bublinky. Metoda je využívána pro laminární a nízkorychlostní proud. [32, 34]



Obr. 5.2 Vizualizace pomocí Al částic[32]

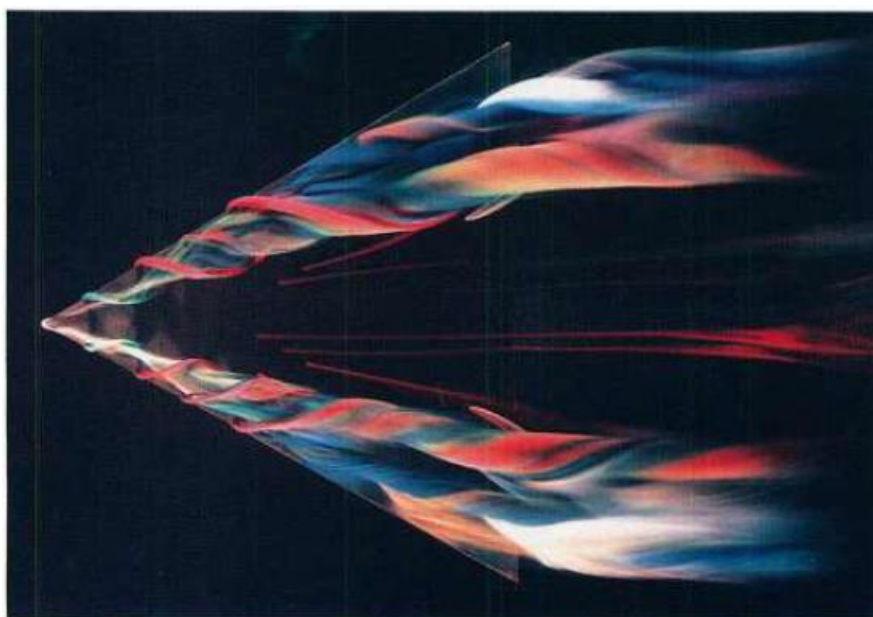


Obr. 5.3 Vizualizace bublinkami [32]

¹⁵ Používá se například prach, magnesium, Al_2O_3 , TiO_2 , hliník, polystyren nebo olejové částice, hydrogen nebo heliové bublinky.

5.1.3 Barvivo

Barvivem je zvýrazňováno proudění v kapalině. Vizualizace je založena na podobném principu jako pomocí kouře ve vzduchu. Barvivo¹⁶ je vstřikováno spolu s testovacím proudem z malé ejektorové trubičky před modelem nebo z otvorů na povrchu objektu. Použití je podmíněno difuzní stabilitou, vysokým kontrastem a hodnotou hustoty barviva blízkou médiu. Pro zlepšení difuzní stability se používá míšení barvy s mlékem nebo alkoholem. Tuk z mléka zpomaluje difúzi a zároveň zvyšuje kontrast. Při zkouškách ve vodních tunelech s uzavřeným okruhem dochází ke kontaminaci tekutiny a je nutné po každé zkoušce okruh vyčistit. [27, 32, 34]



Obr. 5.4 Vizualizace barvivem [35]

5.2 Vizualizace na povrchu obtékaného objektu

Hodnoty smykových sil, tlakových sil a tepelného zatížení způsobeného proudící tekutinou na stěnu pevného objektu jsou předmětem mnoha studií. Vizualizací je možné získat spoustu užitečných dat. Využívá se nátěru nebo nitek na povrchu objektu, které jsou schopny reagovat na působící proud a tím zviditelnit průběh. Musí být dbáno na to, aby se samotnou vizualizací mezní vrstva nenarušila a tak nedošlo k degradaci přesnosti zkoušky. [35]

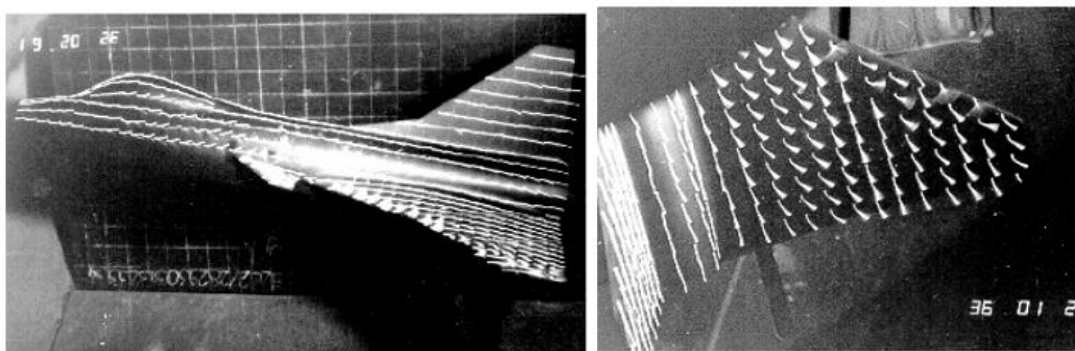
5.2.1 Nitky

Použití nitek je poměrně zastaralá technika avšak stále využívaná. Zkoušky s nitkami probíhají v reálných letových podmínkách i ve větrných tunelech. Používají se pro blízké okolí modelu v subsonických rychlostech. Zpozorované výsledky ovlivňuje velikost, hustota

¹⁶ Malachitová zeleň, indigo, methylenová modř, tuš, inkoust nebo různé anilinové barvy (míšené s alkoholem nebo ředěné vodou)

pokrytí povrchu a způsob upevnění na povrch. Nitky¹⁷ bývají krátce střížené s roztřepenými konci, případně je na nich připevněn malý kousek peří. Nítě jsou rozprostřeny po modelu v pravidelném rozestupu. Mřížka nalepených nitek se pohybuje ve směru proudu.

V případě, kdy průměr nitek dosahuje méně než 0,1 mm, není dobře viditelný jejich pohyb. Problém je způsoben minimem reflektujícího světla. Tato situace je řešitelná použitím fluoreskujícího materiálu. Zvýrazněním je možné použít nitky 0,01-0,1 mm a ty mohou být nalepeny velmi malým množstvím lepidla. Předchází se tak narušení mezní vrstvy. Fluoreskující nitky se využívají i ve vodním tunelu. Pro lepší viditelnost je vhodné ke zkoušce použít pozadí s jiným reflexním koeficientem vůči modelu, nebo zvýšit citlivost filmu. [27, 32]



Obr. 5.5 Fluoreskující chomáče ve větrném tunelu [32]

5.2.3 Povrchový olejový film

Na povrch, který chceme zkoumat, se natírá tenká vrstva olejového filmu. Olejový film je směs oleje a pigmentu¹⁸. Jakmile proud vzduchu obtéká povrch, olej je formován spolu s proudem. Pigment zanechává na povrchu stopu proudu. Vytváří se tzv. striace. Testovaný model je možno přemístit ze zkušebního prostoru a podrobně zkoumat stopu proudu.

Pro každou zkoušku je potřeba zvolit vhodnou směs. Ideálně by směs neměla reagovat na pohyb až do zkušební rychlosti proudu. Během ukončení zkoušky by směs měla být dostatečně odolná vůči nestálému proudění při zastavení proudu. Čím nižší je zkušební rychlost vzduchu, tím nižší by měla být viskozita zvoleného oleje. [34, 35]



Obr.5.6 Olejový film na stěně lopatkové mříže v turbíně [32]

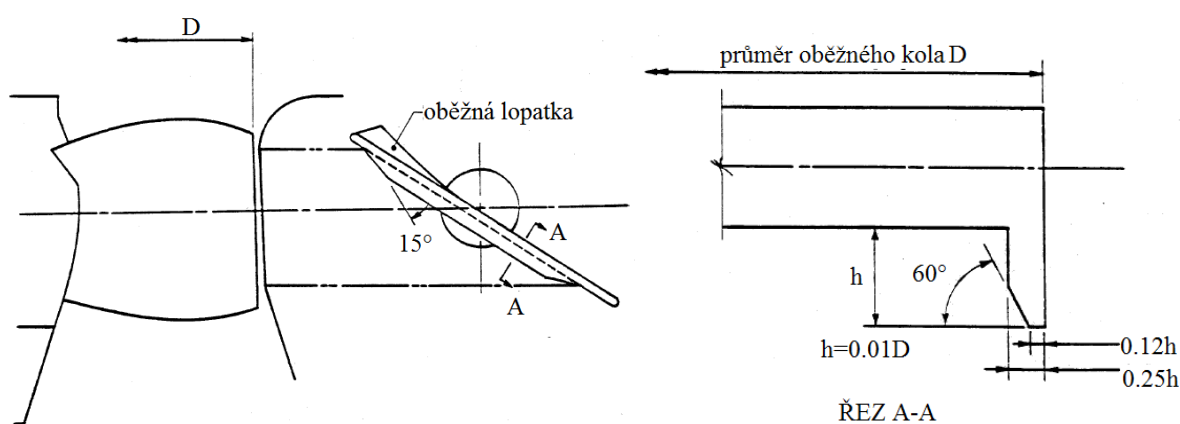
¹⁷ Z nylonu, polyesteru nebo bavlny

¹⁸ Al_2O_3 , TiO_2 , grafit, prach, fluoreskující barvivo, ...

6 Konstrukční část

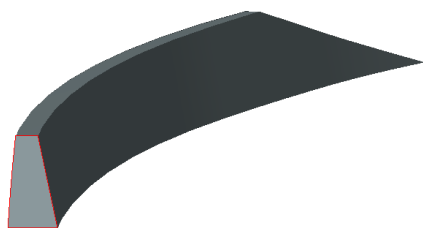
6.1 Návrh wingletu

Návrh wingletu byl proveden v programu Siemens NX Unigraphics. Celkový tvar wingletu byl inspirován a navržen dle dostupné literatury [10, 36]. Rozměry byly přepočteny vůči rozměrům lopatky a tvar přizpůsoben jejímu profilu. Dostupná lopatka byla převzata z oběžného kola o průměru 350 mm. Celý winglet byl dvakrát zvětšen, protože by jeho výroba a upevnění na model při originálních rozměrech nebyla za daných podmínek reálná.

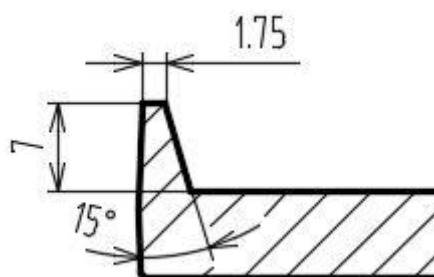


Obr 6.1 Inspirace základních rozměrů wingletu [10]

Následně byl winglet zesílen o níže zřetelný úhel 15° . Vnitřní sražení z předchozího návrhu bylo zanedbáno. Podélný tvar wingletu byl přizpůsoben tvaru lopatky pomocí offsetových ploch.



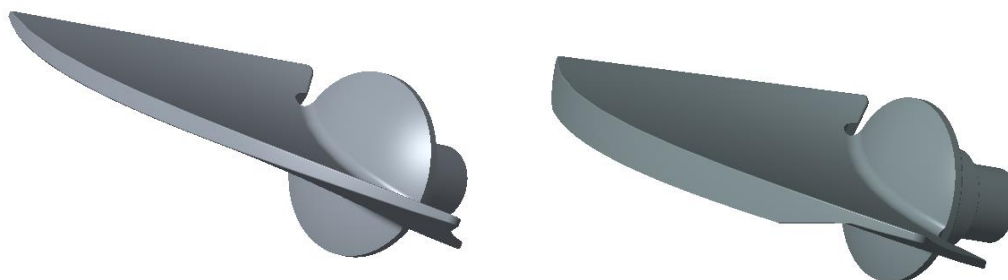
Obr. 6.2 Model wingletu – anti-kavitačního okraje



Obr. 6.3 Příčné rozměry

6.2 Výroba modelu

Model lopatky i wingletu byl vytisknut na 3D tiskárně samostatně a poté na lopatku přilepen. Tisk byl proveden technologií FDM, kdy je termoplastický materiál nanášen tryskou v postupných vrstvách a tak vytvořen požadovaný tvar modelu.



Obr. 6.4 Lopatka bez a s anti-kavitačním okrajem

Povrch lopatky byl dále natřen dvousložkovým epoxidovým bezbarvým lakem. Nutnost úpravy lopatky, si vyžadoval její hrubý povrch vlivem technologie 3D tisku. Hrubost povrchu by mohla ovlivnit výsledky zkoušky. Hladký povrch lopatky byl žádoucí i proto, aby mohl proběhnout experiment využitím vizualizace olejovým filmem.



Obr. 6.5 Vytisknutý model lopatky



Obr. 6.6 Nerovnosti vlivem technologie 3D tisku

6.3 Sestavení prvků experimentu

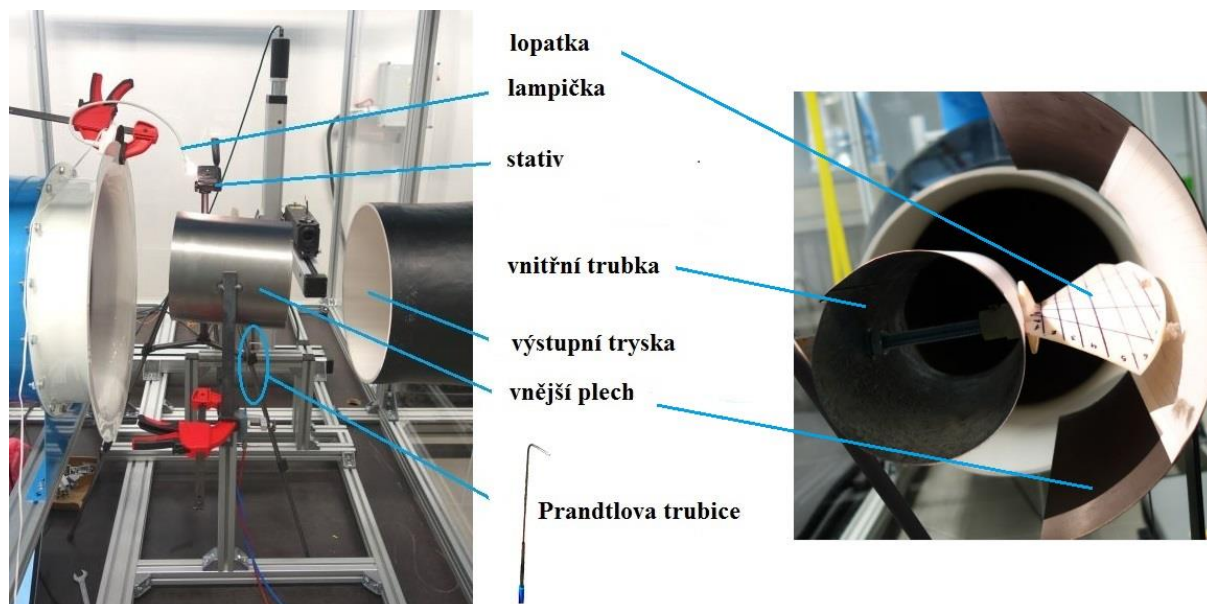
Celá sestava pouze nahrazuje základní prvky turbíny. Z vnitřní strany lopatky byla umístěna trubka, která nahradila vnitřní náboj oběžného kola. Z vnější strany lopatky byla umístěna část plechu, aby simulovala vnější stěnu turbíny. Na část vnějšího plechu byl přilepen milimetrový papír.

Náklon lopatky byl zvolen dle experimentu provedeného v [39]. Lopatka byla nastavena na úhel $4,7^\circ$ mezi střednicí profilu lopatky a proudem vzduchu.

Pozorovaná část byla nasvícena z horního pohledu na sestavu. Celý experiment byl nahráván a snímán fotoaparátem Sony CyberShot DSC-RX100 II s rozlišením 20,2 Mpx, který byl ve většině případů umístěn na stativu. Pod celou sestavou byla umístěna Prandtlova trubice, jenž udávala rychlost zkušební proud. Pro měření byl k dispozici aerodynamický tunel s uzavřeným oběhem a otevřenou testovací sekcí.

Tab. 1 Parametry tunelu

Délka měřicího prostoru	65 cm
Průměr výstupní trysky	45 cm
Rozsah rychlostí proudění vzduchu	$0,5 - 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Plošná kontrakce výstupní trysky	6



Obr. 6.7 Sestavení experimentu

7 Experiment v aerodynamickém tunelu

7.1 Shoda s reálným dějem a předpoklady

Cílem experimentální části bylo ověřit účinek wingletu (anti-kavitačního okraje) na lopatce Kaplanovy turbíny. Dle předchozích kapitol je zřejmé, že winglet redukuje a posouvá vír z povrchu lopatky. Cílem experimentu bylo tedy zachytit vír a potvrdit jeho redukci či posunutí.

Celý experiment byl dle dostupných možností proveden na statickém modelu lopatky turbíny ve větrném tunelu. Vzhledem k dostupným možnostem výroby lopatky a rozměrovým omezením byla velikost lopatky zachována. Mezera mezi lopatkou a stěnou nebyla stálého rozměru, jelikož obvyklý tvar stěny v turbíně bývá sférického charakteru, za daných podmínek tedy nebylo možno tvar lopatky kopírovat. Nejmenší vzdálenost mezi lopatkou a stěnou byla volena závisle na zvolené metodě měření v rozmezí 3 – 5 mm. Experiment nemá podobnostní spojitost s reálným dějem v turbíně. Přesto je možno předpokládat, že bude docházet k ději, který je cílem experimentu.

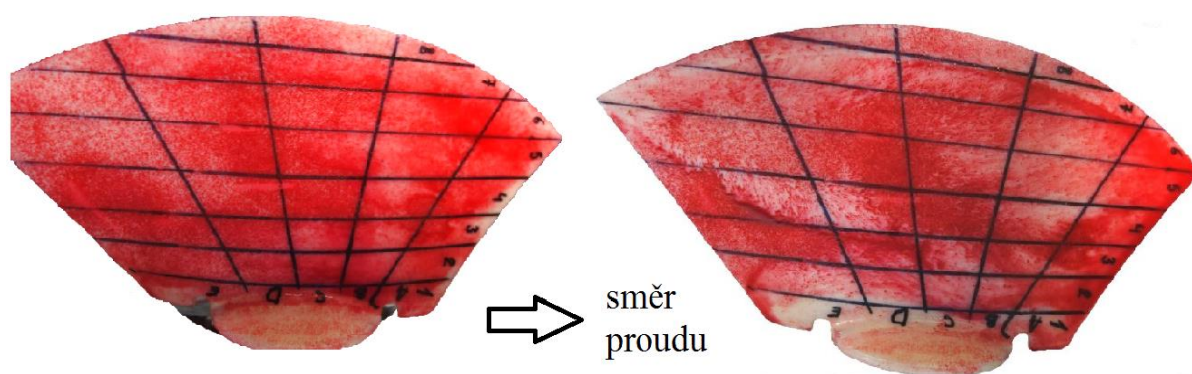


Obr. 7.1 Mezera mezi lopatkou a stěnou

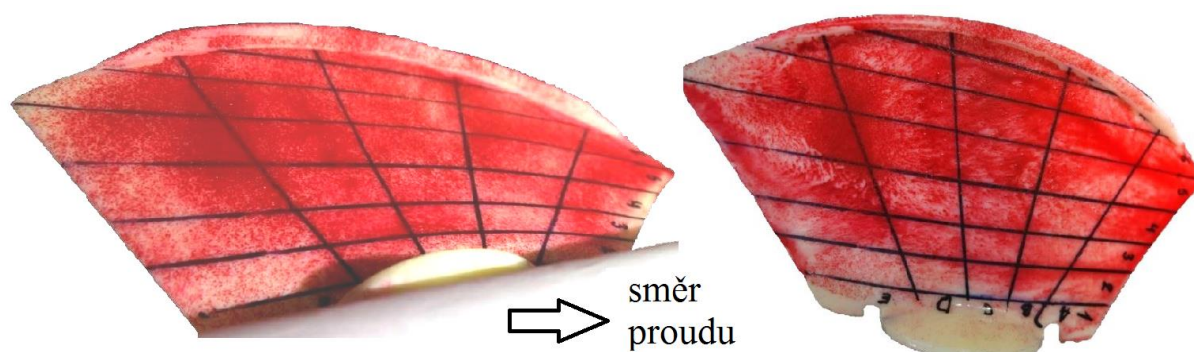
7.2 Vizualizace

7.2.1 Olejový film

Vizualizace olejovým filmem byla uskutečněna za použití jedlého rostlinného oleje¹⁹ a rozdrčené červené křídý. Lopatka byla nejdříve potřena souvislou vrstvou oleje, poté byl na vrstvu oleje rozprášen křídový prášek. Zkouška proběhla při rychlosti 40 m/s, kdy olejový film reagoval na proud. Během měření byl proveden pokus s naneseným olejem na stěnu turbíny. Pokus byl však nezdařilý, jelikož vlivem zahnutého tvaru a svislé polohy olej stékal už před začátkem experimentu.



Obr. 7.2 Olejový film na lopatce bez wingletu před a po zkoušce

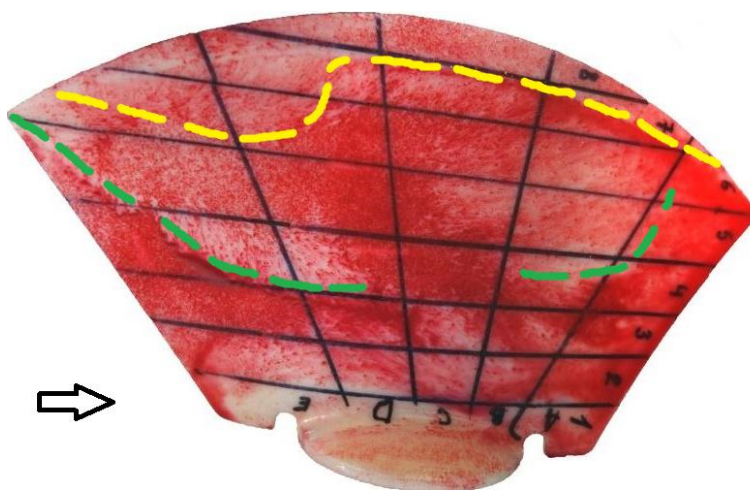


Obr. 7.3 Olejový film na lopatce s wingletem před a po zkoušce

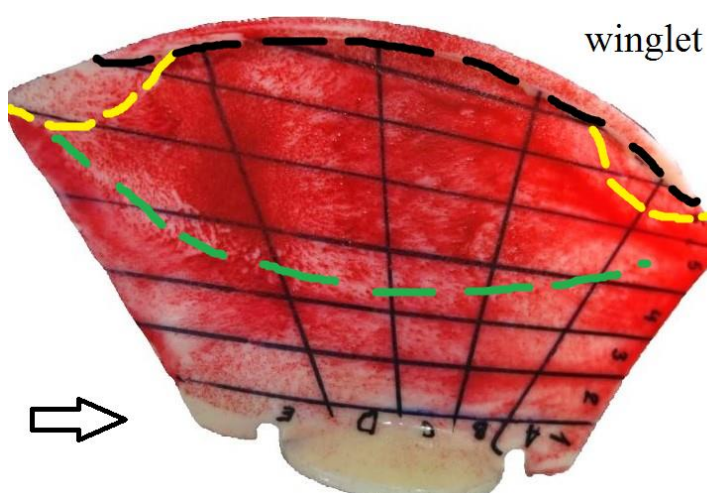
¹⁹ Dynamická viskozita jedlého rostlinného řepkového oleje při 19° je 0,108 Pa.s [38]

Pokus vydává pouze informace ohledně chování proudu na povrchu lopatky. Již od pohledu je zřejmé, že na lopatce bez wingletu dochází ke značnému posunu olejového filmu po obvodu lopatky. Na lopatce s wingletem je jev zřejmý pouze v místech, kde winglet začíná a končí. Je tedy pravděpodobné, že vír vznikající po obvodu lopatky v místech umístění wingletu neovlivnil pohyb olejového filmu. Tedy vír byl úspěšně odkloněn od povrchu lopatky.

Na lopatce je v obou případech oblouk, který se rozprostírá po středu lopatky – vyznačen zeleně. Na lopatce bez wingletu je jeho intenzita znatelně menší. Oblouk by mohl být způsoben vlivem koncového víru, avšak z následujících pokusů není znatelný. Proto je možné, že existence oblouku je způsobena jiným vlivem.



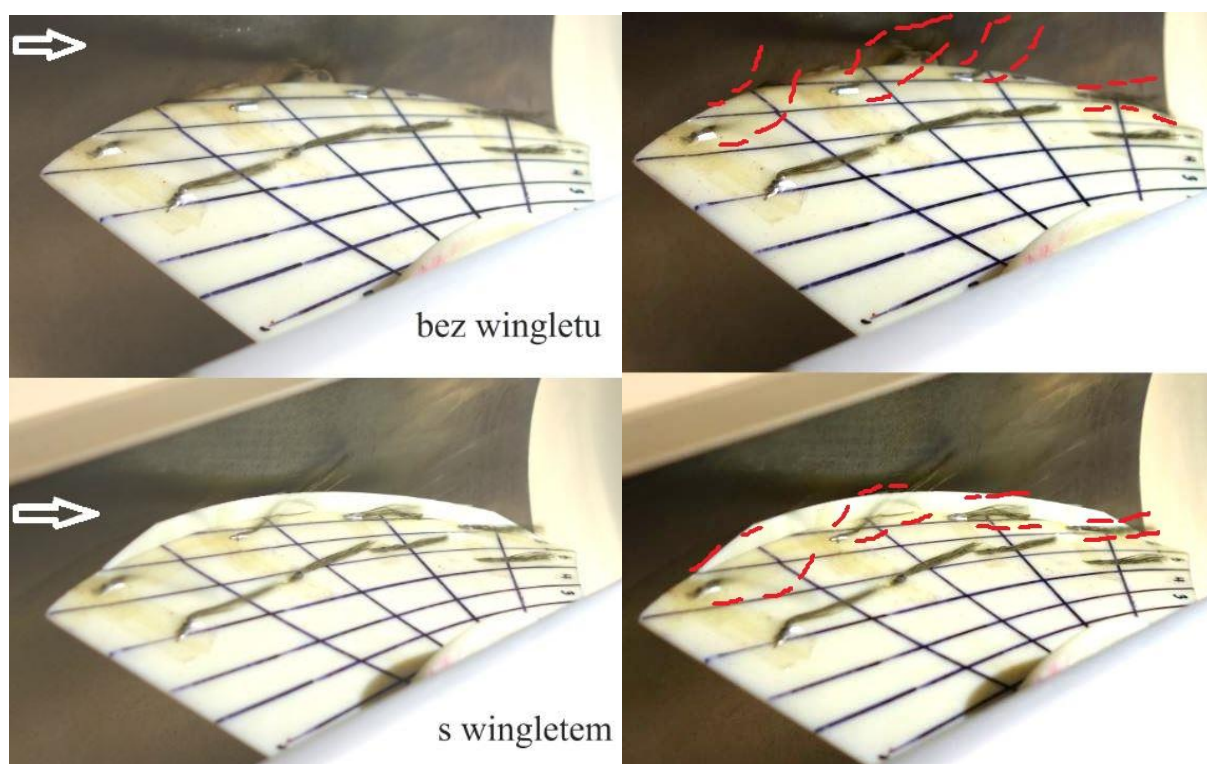
Obr. 7.4 Lopatka bez wignletu



Obr. 7.5 Lopatka s wingletem

7.2.2 Nitě

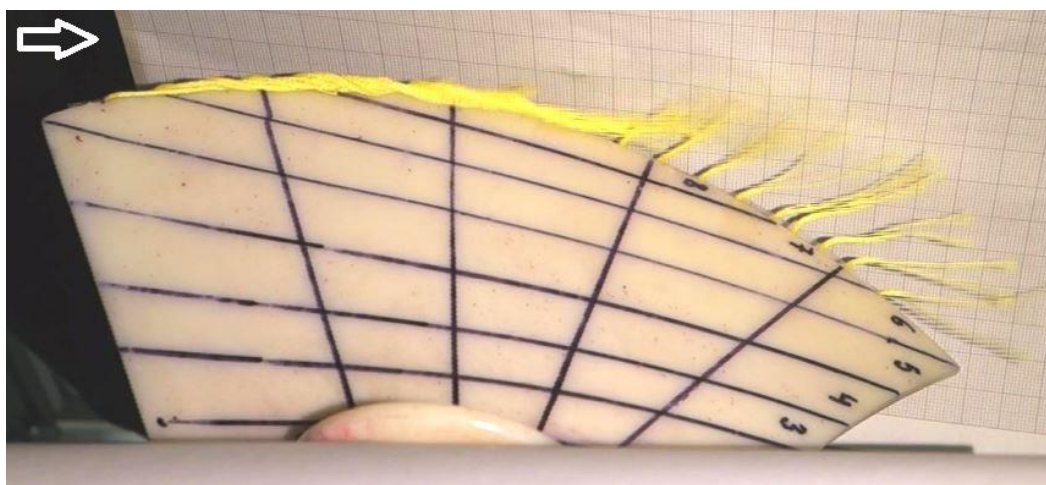
Vizualizace pomocí nití byla provedena ve dvou variantách. První varianta byla za pomoci delších tenkých nití, které byly spojeny do „trsů“ a nalepeny na lopatku. Zkoušeno při rychlosti 24 m/s. Na obrázku 7.6 je zřetelné, že bez použití wingletu reagovaly na proud okrajové trsy nití. Po přilepení wingletu se druhý a třetí okrajový trs uklidnil. Toto chování je pravděpodobně způsobeno vírem, který se v první části pohybuje v blízkosti povrchu lopatky, jak již bylo zmíněno dříve. Tento pokus potvrzuje předchozí tvrzení.



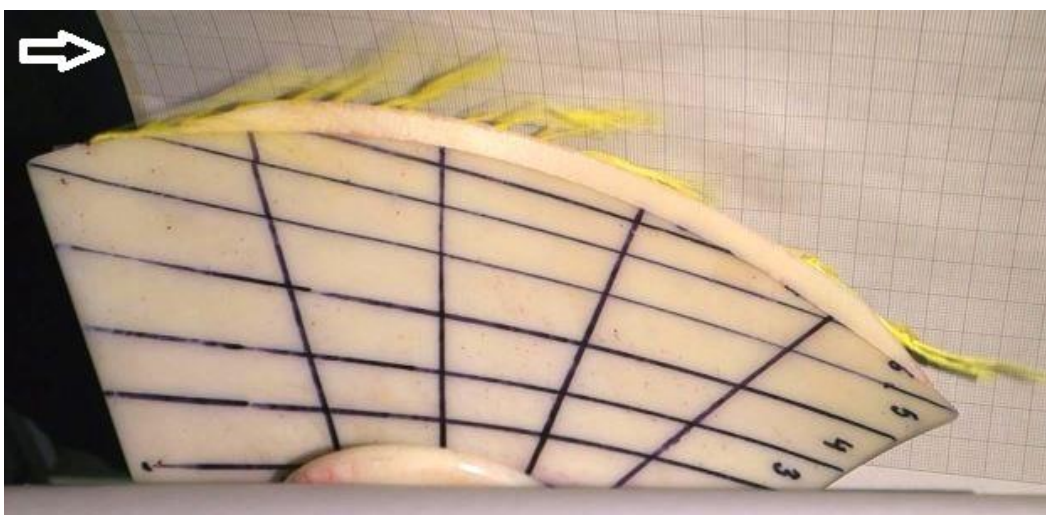
Obr. 7.6 Změna pohybu nití bez a s wingletem

Druhá varianta byla provedena za použití vyšívací příze – šesti zapletených nitek, které byly nalepeny po obvodu lopatky s rozstupem zhruba 10 mm. Zkoušeno při rychlosti 26 m/s. Bez wingletu se nitky třepotaly dle očekávání. Po první části obvodu se sdužily a v druhé části se pouze mihotaly. Toto chování taktéž potvrzuje předchozí tvrzení.

Avšak po přilepení wingletu se nitky chovaly neočekávaně. První část se třepotala mírně nahnutě směrem k lopatce, druhá část se sdužila po obvodu wingletu. Jev může být způsoben tím, že by se vír posunul nad lopatku a takto se nitky zachovaly proto, že následují proud a vír se vyskytuje nad nimi. Další možnost s sebou nese variantu, že byla po přilepení wingletu způsobena nerovnost a nitky se zachytly o okraj lopatky.



Obr. 7.7 Nitky po obvodu lopatky bez wingletu



Obr. 7.8 Nitky po obvodu lopatky s wingletem

7.2.3 Kouř

Vizualizace kouřem nebyla zdařilá. Jak je zřetelné z obrázku 7.9, kouř byl homogenní a hustý. Po celé sledované ploše nebylo možné zpozorovat změnu struktury a tak zachytit sledovaný vír. Vizualizace byla prováděna v rozsahu rychlostí 0,5 – 10 m/s.

Generátorem byla opakovaně vpravena dávka kouře do oběhu tunelu. Poté byla místnost ztmavena a pozorovaný prostor nasvícen laserovou rovinou. Pokus byl aplikován také bez vnější stěny, kdy byl při nízkých rychlostech zaznamenán pohyb kouře, avšak tlaková difference nebyla dostatečná a tak nedocházelo k vytváření víru. Ve vyšších rychlostech pokusu se nepodařilo zachytit nic vypovídajícího. Kouř byl pravděpodobně příliš hustý a difundovaný spolu se vzduchem.

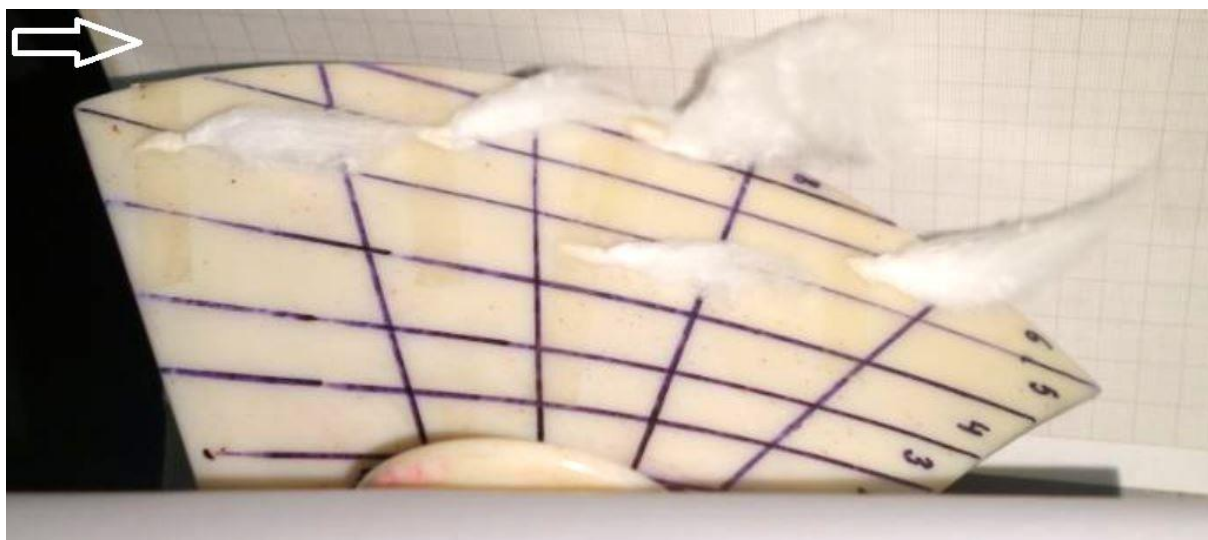
Po dostatečném vyvětrání místnosti byly před lopatku umístěny dvě trubičky, ze kterých vycházel kouř, který unášel proud vzduchu. Nicméně vpravovaný kouř byl naopak příliš řídký a tak se taktéž nepodařilo zachytit nic vypovídajícího. Nadále kouři nebyla věnována pozornost.



Obr. 7.9 Vizualizace kouřem

7.2.5 Vatové chomáče

Vatové chomáče byly v horní části namotány a přilepeny na povrch lopatky lepicí páskou. Zkouška probíhala za rychlosti 21 m/s. Bohužel se vatové chomáče chovaly velmi obdobně v obou případech. Nelze tedy vyvodit zcela použitelný závěr. Nedostatečný rozdíl v chování vatových chomáčů pravděpodobně způsobuje jejich tuhost, velikost a umístění, proto nereagují reflektivně na vytvářený vír a zároveň ovlivňují pozorovanou oblast.



Obr. 7.10 Vatové chomáče na lopatce bez wingletu



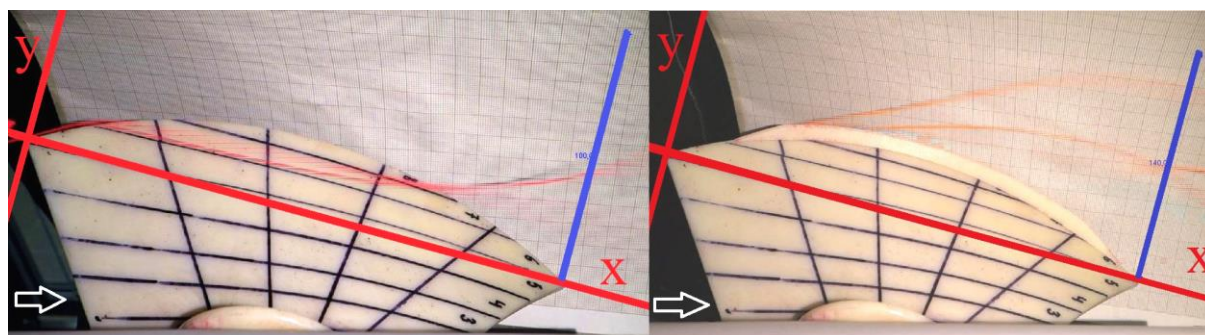
Obr. 7.11 Vatové chomáče na lopatce s wingletem

7.2.6 Dlouhý provázek

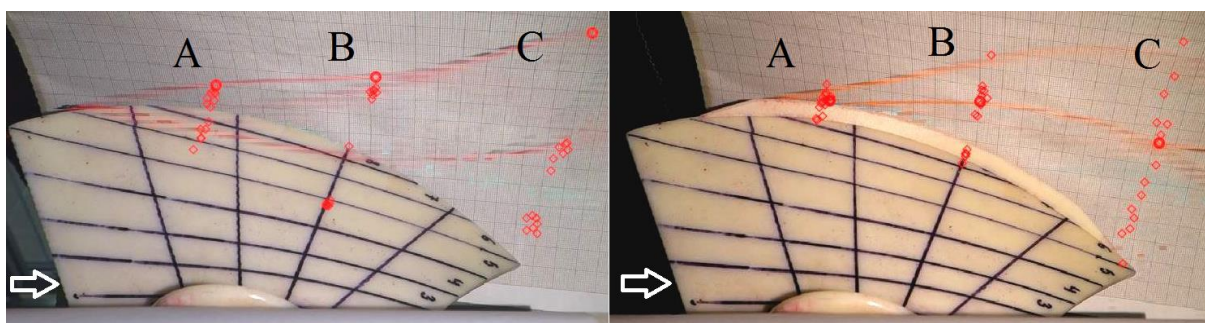
V dostatečné vzdálenosti před modelem byl nastaven provázek, jenž unášel proud. Vzhledem k tomu, že provázek je spojitě „pevné“ těleso, nedá se říct, že by zcela následoval proud. Jelikož chování jeho části na konci může být ovlivňováno chováním části na začátku. Není zcela unášen, jako by tomu bylo v případě miniaturních nezávislých částic. Jelikož se jedná o periodický děj a budou porovnávány dva obdobné případy za stejných podmínek, posunutí i redukce víru by měla být prokazatelná. Údaje jsou však relativní, nevydávají informace o reálných hodnotách. Jev byl pozorován z pohledu horní části a v nakloněném směru, není zřetelný krouživý pohyb ani tvar trajektorie, pouze výkyv, který probíhal ve chvíli, kdy jej zachytil fotoaparát. Měření probíhalo při rychlosti 13 m/s.

Celý proces byl nahráván fotoaparátem s frekvencí 25 fps. Pomocí programu Tracker byla provedena analýza částí videí. Video je rozděleno na jednotlivé snímky, kde je potřeba označit bod, který je středem zájmu, 100 snímků, 100 bodů, 100 hodnot v našem případě za čas 4 s. Program vyhodnotí jednotlivé body vůči předem nastavenému souřadnému systému a měřítku. Z hodnot je možno nadále statisticky analyzovat potřebná data, případně získat údaje o trajektorii pohybu.

Nejdříve bylo hodnoceno 100 snímků, na kterých byla sledována trajektorie tří bodů. Na snímku byl vybrán souřadný systém i měřítko (modrá úsečka), údaje byly v obou případech shodné.



Obr. 7.12 Zavedené měřítko a souřadný systém



Obr. 7.13 Záznam posuvu provázku na lopatce bez a s wingletem

Tab. 2 Porovnání 100 snímků

Hodnoty na ose y	Bez wingletu			S wingletem		
	A	B	C	A	B	C
Střední hodnota	29,7	39,7	44,8	44,2	57,82	57,9
Min	2,89	-4,6	-0,36	31,1	16,5	-8,9
Max	48,2	86,8	126	54,4	94,4	130,7

Rozpětí hodnot symbolizuje velikost víru. Zvětšení víru v oblasti C mohlo být pouze nevhodně zvolenou částí experimentu. Z výsledku je možno rozeznat, že posun oblasti A a B byl dle očekávání, střed daného víru winglet posunul dál od zavedeného souřadného systému a rozmezí hodnot bylo sníženo. Jinak tomu bylo v oblasti C, kde se sice také střední hodnota posunula výš, avšak rozmezí hodnot se rozšířilo.

Na základě této myšlenky byla vyhodnocena jiná část videí, vždy ze 100 snímků. V obou případech došlo ke změně. Střední hodnoty pohybu provázku se pohybují v případě bez wingletu pod hodnotami s wingletem. Je možné tedy říci, že vír byl odkloněn. Ovšem redukce víru je nejasná, jelikož naopak v případě II bez wingletu bylo rozpětí hodnot menší, než v jakémkoli případě s wingletem.

Tab. 3 Jiné části videa 100 snímků bodu C

Hodnoty na ose y	Bez wingletu		S wingletem	
	I	II	I	II
Střední hodnota	51,4	45,29	58,7	56,2
Min	-12,7	-10,9	-9,6	-13,9
Max	157,1	131	147,2	140,2

Vzhledem k nejasnosti výsledků byl proveden pokus z většího spektra hodnot. Vyhodnocováno bylo 300 snímků, jenž potvrdily prvotní domněnku. Střední víry byly ve všech případech posunuty. V bodech A a B byly víry zmenšeny, v bodě C však byl vír zvětšen.

Tab. 4 Porovnání 300 snímků

Hodnoty na ose y	Bez wingletu			S wingletem		
	A	B	C	A	B	C
Střední hodnota	20,7	28,9	31,5	30,4	37,6	42,3
Min	-5,3	-10	-7,5	18,3	5,94	-9,6
Max	38,6	73,57	109,9	38,9	70,72	111,9

Tento závěr je pouze námětem k dalšímu výzkumu, udané hodnoty nemusí být použitelné, protože vyhodnocení náklonu je dáno střední hodnotou a redukce extrémními hodnotami, což může být ovlivněno lokální nestálostí.

Hodnoty odklonu víru nejsou reálné vzhledem k vyhodnocení 2D snímku a nepřesnému měření. Experiment může být ovlivněn posunem stěny během experimentu jak je možno zaznamenat na obrázcích. Daný fakt by však neměl experiment ovlivnit znatelně.

7.2.7 Peří na niti

Vzhledem k předchozímu experimentu, kdy bylo vyhodnocováno chování provázku, jenž reaguje v určitých místech ovlivněně, byly na lopatku připevněny nitě s peřím²⁰ na jejich konci. Peří simuluje dříve zvolené body. Nitě byly přilepeny lepicí páskou na spodní okraj lopatky. Pohyb peří tvořil krouživý pohyb. Rychlost proudu byla 13 m/s.



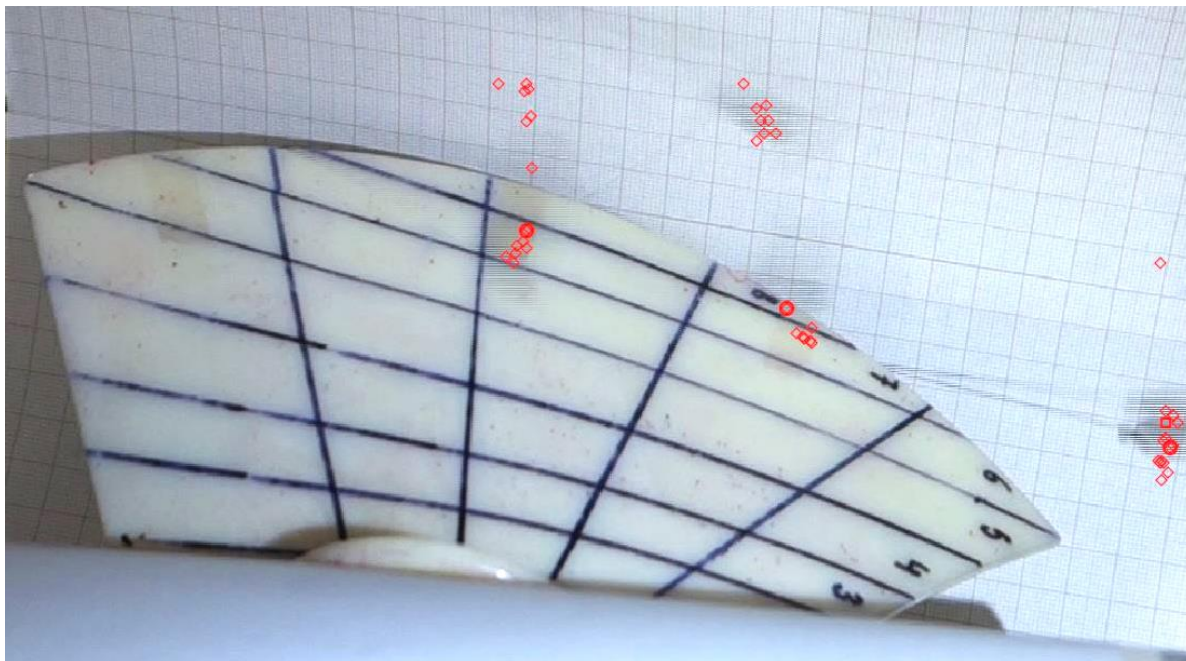
Obr. 7.14 Peří na niti před experimentem

Tab. 5 Porovnání 100 snímků

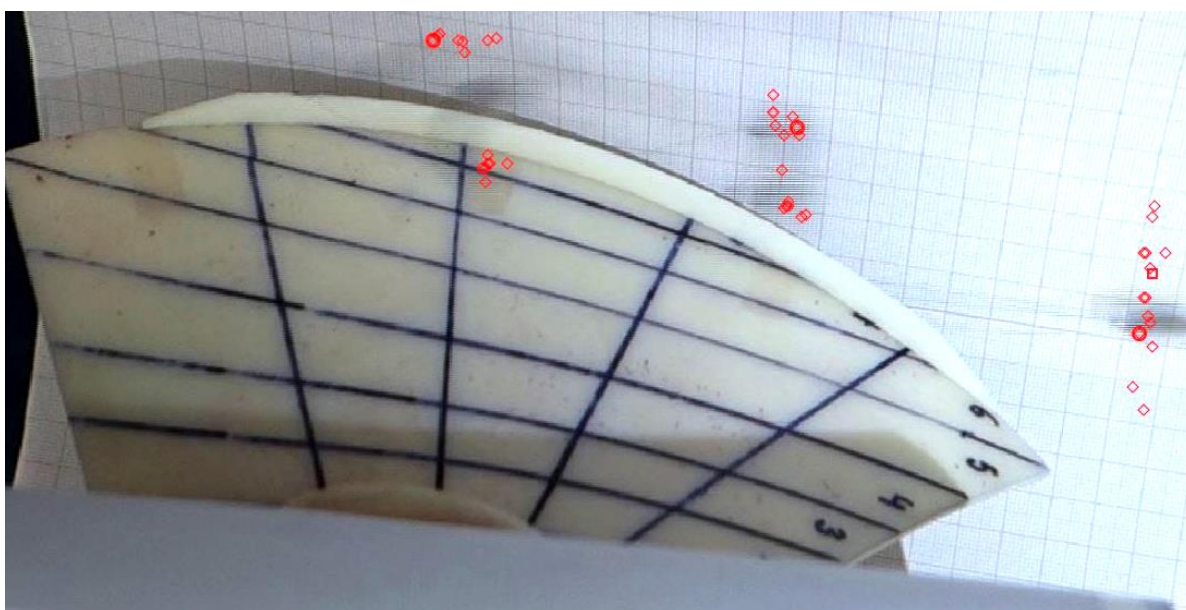
Hodnoty na ose y	Bez wingletu			S wingletem		
	A	B	C	A	B	C
Střední hodnota	41,3	55,9	33,3	38,1	44,9	42,9
Min	15,1	19,7	13,6	19,7	3,1	7,2
Max	68,2	86,1	83	53,9	59	69

Pohyb měl v případě bez wingletu více prostoru. Přidáním wingletu se pomyslně zmenšil i prostor, peří mohlo následovat vír na menším rameni. Tento fakt je vlivem zvolené techniky vizualizace. Proto je i ovlivněn výsledek. Nicméně v bodě A byl dle zachycených dat vír odkloněn. V bodě B se po přidání wingletu peří zachytávalo o okraj lopatky, ačkoli bylo nerovnostem předcházeno pečlivým upevněním wingletu. Data jsou ovlivněna a nemožno posuzovat spolehlivého závěru. Pohyb bodu C byl po přidání wingletu rozptýlen, což potvrzuje předchozí domněnku. Avšak před přidáním wingletu se peří pohybovalo vesměs ve stejných bodech, nelze zcela posoudit, zda se zúčastnilo víru.

²⁰ Peří pochází z perličky kropenaté.



Obr. 7.15 Body ze 100 snímků na lopatce s peřím bez wingletu



Obr. 7.16 Body ze 100 snímků na lopatce s peřím s wingletem

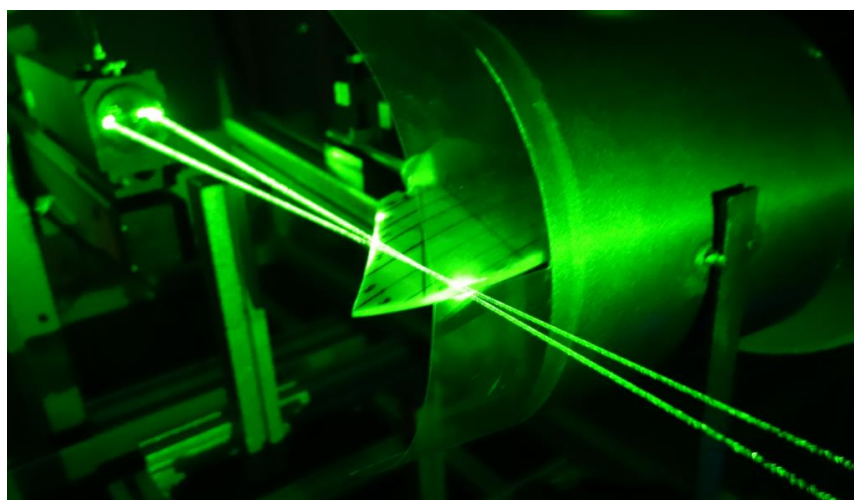
7.3 Měření

Během měření proběhl pokus o naměření hodnot pomocí LDA. Vyskytly se dva hlavní problémy. Prvním problémem byla odrazivost stěny a složitost přístupu k pozorovanému prostoru. Přístup byl umožněn zanedbáním vnitřního náboje, tedy odstraněním vnitřní trubky. Odrazivost stěny byla vyřešena nadstavením vnějšího plechu průhledným plastem. Do plastu byl vystřižen 2 mm široký podélný otvor, který umožnil průchod laseru s minimalizovaným odrazem.

Druhým problémem byla změřitelnost celého děje. Jelikož bylo k dispozici jednosložkové LDA, bylo možné měřit rychlost pouze v jednom směru. V použitém LDA zařízení nebyla aplikována Braggova cela, o které je pojednáváno v rešeršní studii. Nebylo by tedy možné zachytit ani směr naměřených hodnot. Jelikož se v pozorovaném prostoru vyskytovalo především vířivé proudění, nepodařilo by se tak zachytit vypovídající hodnoty, ze kterých by bylo možné vyvodit jakýkoli závěr. Stejnému problému bychom došli v případě využití Prandtlovy trubice, která byla k dispozici, jenž taktéž měří rychlost pouze v jednom směru. Došlo by k naměření hodnot v určitém stavu víru a nebylo by možné vyvodit závěru ani v případě stejného postupu měření v obou variantách, tedy s a bez wingletu.



Obr. 7.17 Vystřižený otvor pro laserový paprsek



Obr. 7.18 Nadstavený vnější plech

Závěr

Práce se stručně věnuje vývoji wingletu jako vědeckého vynálezu a následnému využití v aerodynamickém i hydraulickém průmyslu. Rozsáhlost informací je ovlivněna především oblastmi, do jejichž vývoje bylo investováno více finančních zdrojů a proběhl rozsáhlejší výzkum. Využití ve větrných elektrárnách a lodích je tedy spíše záležitostí uživatelů s nadšením. Následující část práce se zabývá oblastí modelových zkoušek od prvotních po novodobé technologie. Pojednává výhody a nevýhody, oblasti využití a způsob provedení jednotlivých metod.

Na základě rešeršní studie byl proveden experiment věnující se proudění ve spáře vodní turbíny. Vzhledem k zanedbání zásadních prvků a znaků turbíny, provedení experimentu v aerodynamickém tunelu a možnostem změření dosažených výsledků je celý výstup této práce spíše informativní a navnázující k dalšímu výzkumu.

Cílem práce bylo provést proměření vírových struktur za lopatkou při použití wingletu i bez něj. Po pečlivém promyšlení veškerých možností bylo provedeno sedm variant vizualizací a dvě měření. Měření nebylo úspěšné vzhledem k nedostupnosti pozorovaného prostoru, vířivému proudě a nedostupných technologií. Naměření hodnot by bylo reálné za použití metody PIV, jenž je zmíněna v rešeršní studii a pomocí níž proběhl experiment v [39]. Bohužel tato metoda nebyla k dispozici.

Z vizualizačních metod bylo možno alespoň relativně prokázat účinek wingletu. Metodou olejového filmu byl prokázán odklon koncového víru. Využitím nití na povrchu lopatky i po jejím obvodu bylo zřejmé, že i za daných podmínek vzniká vířivé proudění, které se v koncové oblasti lopatky nachází. Následně byl proveden pokus s dlouhým provázkem před lopatkou. Záměrem bylo získat charakter a směr, kterým se vír pohybuje, čehož bylo docíleno. Taktéž bylo vyhodnoceno, že v oblasti kolem lopatky winglet splňuje svůj účel, tedy odklání a redukuje vír. V oblasti za lopatkou není zcela jednoznačný výsledek, avšak je pravděpodobné, že dochází k zvětšení víru. Obdobný náznak proběhl i při posledním vizualizačním pokusu, peřím připevněném na konec nití. Domněnka však v sobě zahrnuje spoustu nejistot spojených s nepřesností měření, rozdílnou tloušťkou mezery mezi lopatkou a stěnou turbíny, vyhodnocováním dat z videí, možnostem umístění nahrávacího zařízení do poloh odkud nebyla zachycena zřetelná trajektorie pohybu a nepřímým následováním proudě použitými metodami. Proto by bylo vhodné se problémem zabývat hlouběji třeba v navazující diplomové práci, kde by mohl být proveden i numerický výpočet.

Seznam použitých zdrojů

- [1] COMMITTEE ON ASSESSMENT OF AIRCRAFT WINGLETS FOR LARGE AIRCRAFT FUEL EFFICIENCY, Air Force Studies Board. Assessment of wingtip modifications to increase the fuel efficiency of Air Force aircraft. Washington, D.C: National Academies Press, 2007. ISBN 03-096-6942-1.
- [2] BARGSTEN, Clayton J. a Malcom T. GIBSON. NASA Innovation in Aeronautics: Select Technologies That Have Shaped Modern Aviation [online]. Washington, DC 20546-0001: NASA Headquarters, 2011, s. 17-28 [cit. 2016-02-08]. ISBN NASA/TM-2011-216987. Dostupné z: http://www.aeronautics.nasa.gov/ebooks/downloads/nasa_innovation_in_aeronautics.pdf
- [3] GUERRERO, Joel E., Dario MAESTRO a Alessandro BOTTARO. UNIVERSITY OF GENOA, DEPARTMENT OF CIVIL, ENVIRONMENTAL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING, DICAT. Biomimetic spiroid winglets for lift and drag control [online]. Italy, 2011 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://www.dicat.unige.it/bottaro/Papers/Guerrero.pdf>
- [4] BROŽ, Václav. Aerodynamika nízkých rychlostí. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 182 s. ISBN 80-010-2347-8.
- [5] KOUTNÍK, T. Návrh wingletu pro LS-3. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Popela, Ph.D..
- [6] Bauer, F., Brůha, O., Jaňour, Z.: Základy proudění – Letecký průvodce 2, Vědecko-technické nakladatelství, Praha 1950
- [7] SARAVANAN, P., K. M. PARAMMASIVAM a S. SELVI RAJAN. Experimental Investigation on Small Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Using Winglets. *Journal of Applied Science and Engineering*. Tamsui, Taiwan, R.O.C.: Tamkang University Press, 2013, **16**(2), 159-164. DOI: 10.6180/jase.2013.16.2.07.
- [8] MIGLIORE, P. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *The Potential for Reducing Blade-Tip Acoustic Emissions For Small Wind Turbines* [online]. Colorado, 2008 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/wind/pdfs/43472.pdf>
- [9] GALDAMEZ, R. G., D. MORENO a J. RODRIGUEZ. FLORIDA INTERNATIONAL UNIVERSITY. *Winglet Design and Analysis for Wind Turbine Rotor Blades* [online]. 2011 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.eng.fiu.edu/mme/robotics/EML4905SeniorDesignProject/SeniorDesignPrSenior/2011Fall/2011fall-T2-WingletsforWindTurbineRotorBlades.pdf>
- [10] DUNCAN, William. U.S. BUREAU OF RECLAMATION. *Turbine Repair* [online]. 2000 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist2_5/vol2-5.pdf
- [11] DREYER, Matthieu. *Mind The Gap: Tip Leakage Vortex Dynamics and Cavitation in Axial Turbines*. Lausanne, 2015. Dostupné také z: http://infoscience.epfl.ch/record/208781/files/EPFL_TH6611.pdf. Disertační práce. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.

- [12] MOTYCAK, L, A SKOTAK a R KUPCIK. Kaplan turbine tip vortex cavitation – analysis and prevention. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2012, **15**(3), 032060-. DOI: 10.1088/1755-1315/15/3/032060. ISSN 1755-1307. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1755-1315/15/i=3/a=032060?key=crossref.2c2e231043e0dcdf385409e4cee2f269>
- [13] SKOTAK, Aleš, Lukáš MOTYCAK, Jiří OBROVSKÝ a Josef MIKULASEK. CKD BLANSKO ENGINEERING, A.S. *Cavitation - General limits for Kaplan turbines power increasing* [online]. Czech Republic, 2012 [cit. 2016-04-02].
- [14] GOHIL, Pankaj P. a R.P. SAINI. Coalesced effect of cavitation and silt erosion in hydro turbines-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, (33), 280-289.
- [15] ESCALER, Xavier, Eduard EGUSQUIZA, Mohamed FARHAT, François AVELLAN a Miguel COUSSIRAT. Detection of cavitation in hydraulic turbines. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006, **20**(4), 983-1007. DOI: 10.1016/j.ymssp.2004.08.006. ISSN 08883270. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327004001475>
- [16] NENNEMANN, Bernd a Thi C. VU. *Kaplan turbine blade and discharge ring cavitation prediction using unsteady CFD* [online]. 2nd IAHR international meeting of the workgroup on cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems. Timisoara, Romania, 2007 [cit. 2016-04-01].
- [17] GREKULA, Mikael a Goran BARK. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. *Experimental Study of Cavitation in a Kaplan Model Turbine* [online]. Goteborg, Sweden, 2001 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/files/246/9412459.pdf>
- [18] SCLAVOUNOS, Paul D. a Yifeng HUANG. Rudder winglets on sailing yachts. *Marine Technology*. 1997, **34**(3), 211-232.
- [19] Winged keel. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Winged_keel
- [20] VACANTI, David. Keel and Rudder Design. *Professional BoatBuilder*. 2005, **95**(1), 76-97.
- [21] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [22] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin* [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002 [cit. 2016-02-20]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>
- [23] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní Turbíny : jejich konstrukce a příslušenství*. druhé rozšířené. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1962. 676 s. ISBN 04-241-62.
- [24] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2016-02-20]. ISBN 978-80-248-1911-2. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>

- [25] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 08-376-0142-8.
- [26] POLEZHAEV, Yury V. Wind tunnels. In: *Thermopedia* [online]. 2011 [cit. 2016-02-28]. DOI: 10.1615/AtoZ.w.wind_tunnels. Dostupné z: <http://thermopedia.com/content/1263/>
- [27] PAVELEK, Milan a Josef ŠTĚTINA. Experimentální metody v technice prostředí. Vyd. 3., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3426-4.
- [28] KUNDYS, J., P. FABIÁN a M. KOZUBKOVÁ. *Měření žárovým anemometrem* [online]. 2004 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/zarovy_anemometr.PDF
- [29] JANALÍK, Jaroslav. VŠB OSTRAVA. *Měření tekutinových mechanismů* [online]. 1995 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_tek_mech.pdf
- [30] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Laser Doppler Anemometry* [online]. 2010 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: http://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper_techniques/LDA.text.pdf
- [31] KOPECKÝ, Václav. Laserová anemometrie v mechanice tekutin. Brno: Tribun EU, 2008. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-357-3.
- [32] SLAVICA, Ristic. *Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I: Non optical Methods* [online]. Scientific Technical Review, 2007, **18**(1) [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2007/1-07/rist/rist.pdf>
- [33] ZUBÍK, Pavel. *Integrální laserová anemometrie* [online]. 2001 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/thesis.pdf>
- [34] RISTIC, Slavica. A - a view in the invisible. Theoretical and Applied Mechanics. 2013, 40(1), 87-119. DOI: 10.2298/TAM1301087R. ISSN 1450-5584. Dostupné také z: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=1450-55841301087R>
- [35] BY W. MERZKIRCH, by W. edited by K. Techniques of flow visualization. Neuilly sur Seine, France: North Atlantic Treaty Organization, Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1987. ISBN 92-835-0438-0.
- [36] COJOCARU, V., D. BALINT, V. C. CAMPAN, D NEDELICU a C. JIANU. Numerical Investigations of Flow on the Kaplan Turbine Runner Blade Anticavitation Lip with Modified Cross Section [online]. 2011 [cit. 2016-03-22]. ISBN 978-1-61804-020-6. Dostupné z: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Corfu/CUTAFLUP/CUTAFLUP-37.pdf>
- [37] KUBÍČEK, M. Výpočet rozložení vztlačky po rozpětí křídla Glauertovou metodou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Zikmund.
- [38] IRGL, Richard. Hodnocení viskozity jedlých rostlinných olejů. Brno, 2011. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Vedoucí práce Doc. Ing. Libor Severa, Ph. D.

- [39] ROUSSOPOULOS, Kimon a Peter A. MONKEWITZ. Measurements of Tip Vortex Characteristics and the Effect of an Anti-Cavitation Lip on a Model Kaplan Turbine Blade. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2000, 64, 119-144

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Rozměr	Veličina
D	[m]	charakteristický rozměr
D_i	[N]	indukovaný odpor
E	[J.kg ⁻¹]	měrná energie hydraulického stroje
Eu	[–]	Eulerovo číslo
Fr	[–]	Froudeovo číslo
H	[m]	spád
L	[N]	vztlková síla
Ma	[–]	Machovo číslo
O	[m]	omočený obvod
Q	[m ³ .s ⁻¹]	průtok
Re	[–]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	plocha
Sh	[–]	Strouhalovo číslo
c_{Di}	[–]	součinitel indukovaného odporu
c_L	[–]	součinitel vztlaku
g	[m.s ⁻²]	gravitační zrychlení
n	[s ⁻¹]	otáčky
p	[Pa]	tlak
p_c	[Pa]	celkový tlak proudu
p_d	[Pa]	dynamický tlak
p_o	[Pa]	neovlivněný tlak proudu
p_s	[Pa]	statický tlak]
u	[m.s ⁻¹]	absolutní rychlost proudu v turbíně
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
v_{ef}	[m.s ⁻¹]	efektivní rychlost
w	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost
δ	[–]	Glauterův opravný součinitel
λ	[–]	šťíhlost křídla
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ	[–]	kavitační součinitel

Zkratka	Význam
CTA	Žárový anemometr – Constant Temperature Anemometry
HS	Hydraulický stroj
KT	Kaplanova turbína
LDA	Laserová dopplerovská anemometrie – Laser Doppler Anemometry
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku – National Aeronautics and Space Administration
PIV	Integrální laserová anemometrie – Particle Image Velocimetry
FDM	Fused Deposition Modeling
3D	Trojdimenzionální
2D	Dvoudimenzionální
fps	frames per second

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Originální design navržený Whitcombem a jeho týmem	15
Obr. 1.2 Používané nebo testované zakončení křídel	15
Obr. 1.3 Znázornění indukovaného odporu	16
Obr. 1.4 Vírový model křídla.....	16
Obr. 1.5 Rozložení rychlostí, úhlů a sil	16
Obr. 1.6 Zmenšená větrná turbína s winglety	17
Obr. 2.1 Typické oblasti výskytu kavitační eroze Kaplanovy turbíny	18
Obr. 2.2 Kavitace v koncové mezeře	19
Obr. 2.3 Dotek koncového víru	20
Obr. 2.4 Kavitační dutiny	20
Obr. 2.5 Kaplanova turbína a problematická kavitace.....	21
Obr. 2.6 Průběh kavitace v koncové mezeře bez a s použitím anti-kavitačního okraje .	21
Obr. 2.7 Winglet na kýlu lodi	22
Obr. 3.1 Znázornění střednice a tětiny profilu.....	24
Obr. 3.2 Schéma otevřeného tunelu s uzavřeným testovacím prostorem	26
Obr. 3.3 Aerodynamický tunel s uzavřeným oběhem	27
Obr. 3.4 Úprava tunelu zamezující odraz vlny	27
Obr. 4.1 Pitotova trubice	28
Obr. 4.2 Prandtlůva trubice	28
Obr. 4.3 Žárový anemometr.....	29
Obr. 4.4 Optická sonda	30
Obr. 4.5 Dopplerovský vzryv	30
Obr. 4.6 Měření metodou LDA	30
Obr. 4.7 Měření metodou PIV	31
Obr. 5.1 Vizualizace kouřem leteckého profilu	33
Obr. 5.2 Vizualizace pomocí Al částic	33
Obr. 5.3 Vizualizace bublinkami	33
Obr. 5.4 Vizualizace barvivem	34

Obr. 5.5 Vizualizace pomocí fluoreskujících chomáčů ve větrném tunelu	35
Obr. 5.6 Vizualizace pomocí olejového filmu na stěně lopatkové mříže v turbíně.....	35
Obr. 6.1 Inspirace základních rozměrů wingletu.....	36
Obr. 6.2 Model wingletu – anti-kavitačního okraje.....	36
Obr. 6.3 Příčné rozměry.....	36
Obr. 6.4 Lopatka bez a s anti – kavitačním okrajem	37
Obr. 6.5 Vytisknutý model lopatky	37
Obr. 6.6 Nerovnosti vlivem technologie 3D tisku.....	37
Obr. 6.7 Upevnění v tunelu.....	38
Obr. 7.1 Mezera mezi lopatkou a stěnou	39
Obr. 7.2 Olejový film na lopatce bez wingletu před a po zkoušce	40
Obr. 7.3 Olejový film na lopatce s wingletem před a po zkoušce	40
Obr. 7.4 Lopatka bez wingletu	41
Obr. 7.5 Lopatka s wingletem.....	41
Obr. 7.6 Změna pohybu nití bez a s wingletem.....	42
Obr. 7.7 Nitky po obvodu lopatky bez wingletu	43
Obr. 7.8 Nitky po obvodu lopatky s wingletem.....	43
Obr. 7.9 Vizualizace kouřem	44
Obr. 7.10 Vatové chomáče na lopatce bez wingletu	45
Obr. 7.11 Vatové chomáče na lopatce s wingletem.....	45
Obr. 7.12 Zavedené měřítko a souřadný systém.....	46
Obr. 7.13 Záznam posuvu provázku na lopatce bez a s wingletem.....	46
Obr. 7.14 Peří na nití před experimentem.....	49
Obr. 7.15 Body ze 100 snímků na lopatce s peřím bez wingletu	50
Obr. 7.16 Body ze 100 snímků na lopatce s peřím s wingletem	50
Obr. 7.17 Vystřižený otvor pro laserový paprsek.....	51
Obr. 7.18 Nadstavený vnější plech	51

Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry tunelu.....	38
Tab. 2 Porovnání 100 snímků	47
Tab. 3 Jiné části videa 100 snímků bodu C	47
Tab. 4 Porovnání 300 snímků	48
Tab. 5 Porovnání 100 snímků	49