



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**VIZUALIZACE PŘECHODU LAMINÁRNÍ MEZNÍ VRSTVY
NA TURBULENTNÍ PŘI MĚŘENÍ V AERODYNAMIC-
KÉM TUNELU**

BOUNDARY LAYER TRANSITION VISUALIZATION IN AERODYNAMIC TUNNEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DENIS HOLÍK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROBERT POPELA, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Denis Holík**
Studijní program: Letecká a kosmická technika
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

Vizualizace přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní při měření v aerodynamickém tunelu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při proudění vzduchu okolo zpětných zrcátek na automobilech může za určitých okolností docházet na horní straně zrcátka k neúplnému přechodu laminární mezní vrstvy (LMV) na turbulentní (TMV). LMV má následně tendenci se předčasně odtrhnout. Toto odtržení se může projevit nárůstem součinitele aerodynamického odporu a vznikem vysokofrekvenčního hluku. V současné době lze jev v aerodynamickém tunelu rozpoznat měřením akustickým zrcadlem (náročné na přípravu) a vhodná poloha turbulátoru na horním krytu zpětného zrcátka se ladí experimentálně. Cílem diplomové práce je navrhnout metodu pro vizualizaci přechodu LMV na TMV použitelnou při měření v aerodynamickém tunelu.

Cíle diplomové práce:

Navrhnout metodu pro vizualizaci přechodu laminární mezní vrstvy do turbulentní mezní vrstvy, zejména pro aplikaci při tunelovém měření automobilů. Provedení ověření tunelovým měřením např. na součásti automobilu.

Seznam doporučené literatury:

Schütz, T.: Aerodynamics of Road Vehicle (2015).

Laminar Flow Whistle on a Vehicle Side Mirror – SAE 2007-01-1549.

Merzkirch, W.: TECHNIQUES OF FLOW VISUALIZATION AGARD-AG-302, 1987.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Účelem práce byl návrh a otestování zobrazovací metody umožňující vizualizaci přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní a vizualizaci laminární separace mezní vrstvy na zpětném zrcátku automobilu. Začátek práce pojednává o teoretických základech spojených se vznikem mezní vrstvy a jejím vývojem za různých podmínek. Následně byl proveden průzkum existujících zobrazovacích metod umožňujících zobrazení proudění na povrchu těles. Z těchto metod byla na základě zadaných charakteristik zvoleno zobrazování s použitím termovizní kamery. Jako kontrolní byla vybrána metoda využívající olejového filmu (oilflow). Za použití obou metod byly provedeny experimenty, které potvrdily vhodnost termovizní metody pro vizualizaci přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní mezní vrstvu. Konečný test odhalil přítomnost laminární separace mezní vrstvy na horním krytu zpětného zrcátka. Na konci práce byly shrnuty možné chyby spojené s oběma zvolenými způsoby vizualizace a navrhnuty způsoby jak zapojit termovizní metodu do testování v automobilovém průmyslu.

Abstract

The purpose of the thesis was to propose and test an imaging method that allows visualization of the transition of a laminar boundary layer to a turbulent one and visualization of laminar boundary layer separation on the side mirror of a car. The beginning of the paper discusses the theoretical foundations associated with boundary layer formation and its evolution under various conditions. Afterwards, a survey of existing imaging methods that allow the display of flow on the surface of bodies was carried out. Of these methods, imaging using a thermal imaging camera was selected on the basis of the specified characteristics. The method using oil film (oilflow) was chosen as a control. Using both methods, experiments were conducted to confirm the suitability of the thermal imaging method for visualizing the transition of a laminar boundary layer to a turbulent boundary layer. The final test revealed the presence of laminar boundary layer separation on the upper cover of the car side mirror. At the end of the thesis, possible errors associated with the two chosen visualization methods were summarized, and ways to incorporate the thermal imaging method into automotive testing were proposed.

Klíčová slova

mezní vrstva, vizualizace, přechod, laminární, turbulentní, separace mezní vrstvy, termografie, experiment, zpětné zrcátko od auta

Keywords

boundary layer, visualization, transition, laminar, turbulent, separation of boundary layer, thermography, experiment, vehicle side mirror

Citace

HOLÍK, Denis. *Vizualizace přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní při měření v aerodynamickém tunelu*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Robert Popela, Ph.D.

Vizualizace přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní při měření v aerodynamickém tunelu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma *Vizualizace přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní při měření v aerodynamickém tunelu* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce Ing. Roberta Popely, Ph.D. s použitím odborné literatury, která je citována v práci a uvedena v seznamu literatury na konci práce.

.....
Denis Holík
26. května 2023

Poděkování

Děkuji všem, díky kterým tato práce mohla vzniknout.

Obsah

1	Úvod	3
2	Proudění – teorie	4
2.1	Reálná a ideální tekutina	4
2.2	Viskozita	4
2.3	Reynoldsovo číslo	6
2.4	Mezní vrstva	7
2.4.1	Přechod LMV na TMV	9
2.4.2	Ovlivnění přechodu LMV na TMV	11
2.4.3	Separace mezní vrstvy	13
3	Vizualizace proudění na povrchu těles	16
3.1	Bavlnkové sondy	16
3.2	Olejevý film	18
3.3	Sublimační metoda	19
3.4	Kaolín	20
3.5	Tekuté krystaly	21
3.6	Termovizní metoda	21
3.7	Výběr vizualizační metody	23
4	Experimentální část	25
4.1	Současný stav	25
4.2	Vybavení a metodika	26
4.2.1	Větrný tunel	26
4.2.2	Oilflow	27
4.2.3	Termovizní metoda	28
4.3	Plochá deska	29
4.3.1	Plochá deska – závěr	34
4.4	Válec	35
4.4.1	Válec – vyhodnocení	38
4.5	Zpětné zrcátko	38
4.5.1	Zpětné zrcátko – závěr	41
4.6	Chyby měření	41
4.7	Návrh způsobu chlazení či ohřevu	43
4.7.1	Chlazení modelu	43
4.7.2	Ohřev modelu	44
5	Závěry	45

Kapitola 1

Úvod

Během návrhu a vývoje většiny dopravních prostředků, mezi něž patří letouny, automobily a další, se hojně využívá měření prováděných ve větrném tunelu. Za použití rozličných testovacích metod je tak zjištěno, jestli daný model splňuje požadované parametry nebo je třeba provést úpravy pro jejich dosažení. Mezi nežádoucí jevy, které lze pozorovat, patří aeroakustické jevy, které mohou být spojeny s přechodem laminární mezní vrstvy (LMV) na turbulentní (TMV), resp. s předčasnou separací LMV.

Konkrétně tento problém lze sledovat u zpětných zrcátek některých automobilů. V současné době je v automobilovém průmyslu pro indikaci přechodu LMV na TMV využíváno metody olejového filmu (oilflow) nebo akustického zrcadla. První ze zmíněných metod je však poměrně zdoluhavá a v mnohých případech vede ke znečištění měřicí sekce. Využití akustického zrcadla je spojeno s náročnou přípravou a úprava vedoucí k hluku je následně hledána experimentálně. Nedostatky obou metod tak vedou k prodloužení doby testování ve větrném tunelu, jehož provoz je finančně nákladný. Cílem této práce je najít a otestovat vizualizační metodu, která by nebyla spojena se zmíněnými potížemi, tedy aby byla snadno aplikovatelná, rychlá a neinvazivní. V konečném důsledku má hledaná metoda zefektivnit, resp. zkrátit dobu měření ve větrném tunelu při zachování předešlé kvality a tím snížit finanční výdaje.

Součástí této práce je také ověření zvolené vizualizační metody, což bude provedeno na prototypu zpětného zrcátka osobního automobilu Škoda Enyaq. Na zpětném zrcátku byl za použití akustického zrcadla při rychlosti 40m/s identifikován vysokofrekvenční hluk (laminar flow whistle) v podobě pískání. Nebyly však provedeny vizualizační zkoušky, tudíž je třeba potvrdit či vyvrátit, jestli pískání vzniká důsledkem přechodu LMV na TMV, resp. separací LMV, či nikoli.

Kapitola 2

Proudění – teorie

V této kapitole budou stručně popsány jevy a fyzikální závislosti provázející vznik mezní vrstvy (MV) a její laminární a turbulentní režim. Dále budou popsány přechod LMV na TMV a okolnosti ovlivňující jeho vznik. Součástí kapitoly bude také objasnění separace LMV a TMV.

2.1 Reálná a ideální tekutina

Pro případ ideálního plynu nedochází při proudění mezi jednotlivými sousedícími vrstvami ke vzniku žádného smykového tření, resp. smykového napětí, dochází pouze ke změnám tlaku, což má za následek vznik normálových sil působících na povrch. Toto tvrzení vypovídá o tom, že na změnu tvaru ideální plyn nereaguje žádným odporem. Tento model je však dobře matematicky popsán a v některých případech je dostatečný k vyhodnocení reálného proudění, např. pohybu vln nebo proudu tryskající kapaliny. Nedostatky teorie ideálního plynu se objevují v případě výpočtu odporu těles, kdy teorie udává pro těleso pohybující se rovnoměrně v podzvukovém proudu nulový odpor. Tento jev se nazývá D’Alambertův paradox. [28]¹

Tento fenomén je zapříčiněn právě nepřítomností smykového napětí mezi přiléhajícími vrstvami tekutiny. Současně nedochází ke tření mezi stěnou obtékaného tělesa a proudem, jímž je těleso obtékáno. Tudíž nabíhající proud hladce klouže po stěnách tělesa a tedy lze sledovat rozdíl rychlostí na hranici stěny a sousedící vrstvy proudu.

Naopak u reálných tekutin médium přiléhá ke stěně a jeho rychlost je tedy nulová. Tato podmínka je běžně nazývána jako *no-slip condition* a je důsledkem smykových napětí, která v tekutinách vznikají na základě jejich viskozity, což bude vysvětleno v podkapitole 2.2.

Pro praktické použití lze vodu a vzduch považovat za ideální tekutiny, jelikož jejich viskozita je nízká a tedy i smyková napětí a tečné síly vznikající jako produkty proudění jsou malé. Za cenu odchylky ve výsledku je tak možno v mnohých případech používat značně zjednodušený model ideální tekutiny.

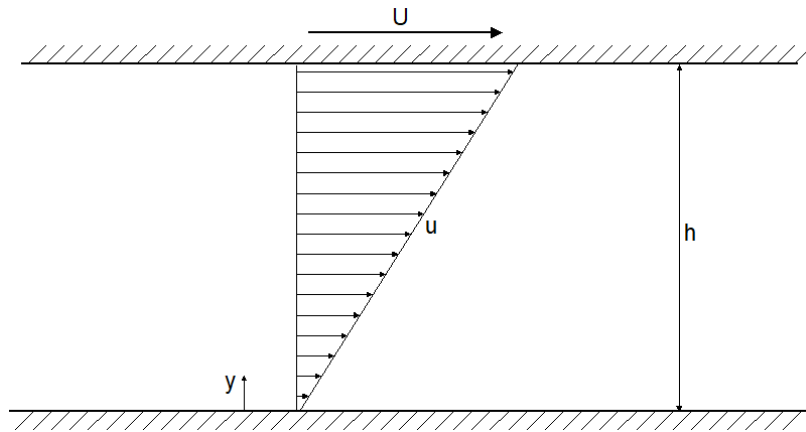
2.2 Viskozita

Viskozitu lze popsat jako odpor tekutiny proti skluzu mezi jejími jednotlivými vrstvami nebo úroveň smykového napětí, které vzniká v důsledku změny tvaru či deformace tekutiny. [12]

¹Pokud v Kap. 2 nebude uvedeno jinak, bylo čerpáno z tohoto zdroje ([28]).

Podle [28] je nejlépe možno vysvětlit viskozitu na experimentu. Máme-li dvě rovnoběžné dlouhé desky, mezi nimiž se nachází tekutina, a jedna z desek zůstává nehybná, zatímco druhá se pohybuje konstantní rychlostí U , mezera mezi deskami odpovídá vzdálenosti h , platí předpoklad konstantního tlaku napříč tekutinou. Experiment ukazuje, že dochází k přiléhání tekutiny ke stěně každé z desek, což se projevuje změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti od nehybné plochy. Je-li uvažovaná tekutina Newtonovská, jedná se o nejjednodušší případ a rychlost mezi deskami vykazuje lineární průběh, viz Obr. 2.1. Rychlost u v daném bodě je přímo úměrná vzdálenosti y a lze ji popsat následovně:

$$u(y) = \frac{y}{h} \cdot U. \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Rychlostní profil mezi dvěma deskami [12]

ve směru pohybu horní desky tak musí docházet ke vzniku tečných sil, které napříč vrstvou tekutiny udržují její pohyb a zajišťují rovnováhu třecích sil. Tečné síly, vzhledem k výsledku experimentu, jsou úměrné U/h a působí-li na jednotku plochy, vyvolávají smykové napětí τ úměrné du/dy . Smykové napětí v tekutinách lze popsat rovnicí:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}. \quad (2.2)$$

Konstanta popisující vztah mezi τ a du/dy vypovídá o fyzikálních vlastnostech tekutiny a dále bude nazývána jako dynamická viskozita η . Jednotku dynamické viskozity lze odvodit ze vztahu 2.2 jako:

$$\eta = \tau \cdot \frac{dy}{du} = \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot \left[\frac{m}{\frac{m}{s}} \right] = [Pa \cdot s].$$

Pro tekutiny s malou viskozitou jako je voda, vzduch nebo alkohol má dynamická viskozita nízkou hodnotu, naopak pro viskóznější tekutiny, např. oleje nebo glycerol, nabývá velmi vysokých hodnot. Hodnoty dynamické viskozity některých látek při teplotě 300 K jsou vypsány v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Dynamická viskozita [1], [16]

Tekutina	η [Pa · s]
Vzduch	$18,45 \cdot 10^{-6}$
Nafta	$1,398 \cdot 10^{-5}$
Voda	$8,53 \cdot 10^{-4}$
Etanol	$10,95 \cdot 10^{-4}$
SAE 50	0,39
Glycerin	0,95

V případech společného působení třecích a hybnostních sil je důležité uvádět do kontextu poměr mezi dynamickou viskozitou η a hustotou tekutiny ρ . Tento poměr je nazýván *kinematická viskozita* ν a je popsán rovnicí 2.3.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\nu] = \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (2.3)$$

Jak uvádí [28], viskozita je dominantně ovlivňována teplotou a tlakem. Pro plyny platí, že jejich viskozita narůstá spolu se zvyšující se teplotou, pro kapaliny je tomu přesně naopak, jejich viskozita s narůstající teplotou klesá.

2.3 Reynoldsovo číslo

Tento parametr byl objeven Osbornem Reynoldsem v jeho práci, viz [26], a je velmi významný pro určení mechanické shodnosti proudění okolo dvou geometricky stejných těles, např. pro dvě různě velké koule. Proudění okolo těchto dvou těles je pak mechanicky shodné pro různé tekutiny, rychlosti proudu a velikosti těles. Reynoldsovo číslo popisuje vzájemný poměr mezi hybnostními a viskozními silami působícími v tekutinách a zachování tohoto poměru:

$$konst. = \frac{\text{hybnostní síly}}{\text{viskozni síly}}.$$

Veličinami popisujícími hybnost tekutiny jsou hustota ρ , rychlost nerozrušeného proudu U a charakteristický rozměr tělesa d . Pro popis viskozních sil pak lze použít dynamickou viskozitu η nebo kinematickou viskozitu ν . Výsledný tvar rovnice je tedy:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot d}{\eta} = \frac{U \cdot d}{\nu}. \quad (2.4)$$

Jestliže jednotky výše zmíněných veličin odpovídají:

$$[\rho] = \frac{kg}{m^3}, [U] = \frac{m}{s}, [d] = m, [\eta] = \frac{kg}{ms},$$

pak lze rozměr Reynoldova čísla popsat následovně:

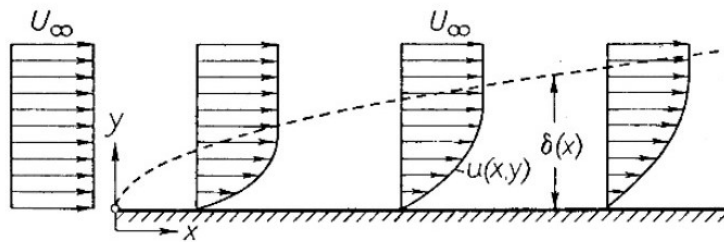
$$\left[\frac{\rho \cdot U \cdot d}{\eta} \right] = \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s} \cdot m \cdot \frac{ms}{kg} = 1. \quad (2.5)$$

Z tohoto je patrný bezrozměrný charakter Reynoldsova čísla.

2.4 Mezní vrstva

Zásadním přínosem pro popis mezní vrstvy byla práce L. Prandtl [23]. Prandtl objasnil působení viskozity při proudění s vysokým Reynoldsovým číslem a jak lze Navier-Stokesovy rovnice zjednodušit tak, aby vedly v tomto limitním případě ke správné aproximaci.

Tato problematika bude vysvětlena na příkladu, kdy je stěna tělesa, viz Obr. 2.2, obtékána nerušeným proudem tekutiny o velmi nízké viskozitě. Rychlosti v okolí tělesa jsou v řádu rychlostí volného proudu až na velmi blízké okolí povrchu tělesa. Proudnic i rychlostní profil širšího okolí jsou téměř identické případu s neviskózním proudem. Podrobnější výzkum však ukazuje, že rychlost proudu ve vrstvě přilehlé ke stěně je nulová, což je zásadní rozdíl proti neviskóznímu proudu, kde lze u stěny pozorovat nenulovou rychlost. Příčinou tohoto jevu je právě viskozita tekutiny a třecí síly vznikající v jejím důsledku, což bylo vysvětleno na experimentu v kapitole 2.2.



Obrázek 2.2: Schématické znázornění mezní vrstvy a rychlostního profilu [28]

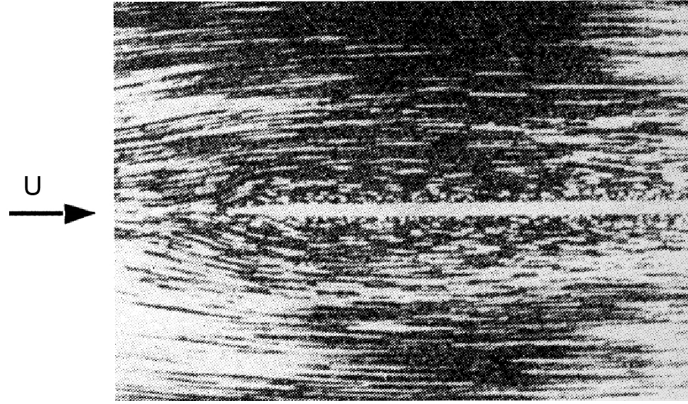
Ve velmi tenké vrstvě, která je nazývána *mezní* nebo také *třecí vrstva* (dále jen MV), je tedy přítomný vysoký nárůst rychlosti z nuly na rychlost okolního proudu. Okolí obtékaného tělesa lze tedy rozdělit na dva regiony, viz Obr. 2.3, mezi kterými neexistuje ostrá hranice:

1. Tenká oblast sestávající z vrstev v těsné blízkosti povrchu, kde je přítomný vysoký gradient rychlosti ve směru kolmém k povrchu. V této vrstvě i viskozita o nízké hodnotě nabývá značného významu, jelikož třecí síla odpovídající $\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}$ se vzhledem k nízké vzdálenosti od povrchu stává výraznou.
2. Region vzdálený od povrchu, mimo mezní vrstvu, ve kterém nejsou přítomny vysoké gradienty rychlostí, tudíž je vliv viskozity zanedbatelný. V této oblasti je možno uvažovat proudění bez tření.



Obrázek 2.3: Schématické zobrazení regionů obklopujících obtékané těleso [12]

Vizualizace MV na ploché desce je reprezentována obrázkem 2.4. Tento experiment byl proveden ve vodním kanálu a pro zobrazení proudnic byly na hladinu nasypány hliníkové částice. Částice nacházející se v MV mají viditelně nižší rychlost než okolní částice.



Obrázek 2.4: Vizualizace MV ve vodním kanálu [33]

Při obtékání tělesa s ostrou náběžnou hranou tloušťka mezní vrstvy roste z nulové hodnoty se vzdáleností od náběžné hrany x . Podle [12] u těles s tupou náběžnou hranou, jako jsou profily křídel, mezní vrstva vzniká na horním i dolním povrchu směrem od stagnačního bodu, kde její počáteční tloušťka nemusí být nulová. V obou případech dochází s narůstající vzdáleností x ke zvyšování tloušťky mezní vrstvy δ , což je důsledkem interakce mezi vrstvou sousedící se stěnou a k ní přilehlými vrstvami, které propagují zbrždění dále od povrchu.

Hranice mezní vrstvy nemůže být přesně určena, jelikož efekt viskozity se asymptoticky vytrácí s narůstající vzdáleností od povrchu. V důsledku čehož se také rychlost u asymptoticky blíží rychlosti volného proudu U . Proto jako hranice mezní vrstvy bylo určeno místo, kde u dosahuje rychlosti $0,99U$. Tloušťka MV s ohledem na zmíněnou hranici je pak značena jako $\delta_{0,99}$.

Jestliže se částice v každé z vrstev MV pohybují rovnoměrně a jsou pravidelně uspořádány, je možno tuto MV pojmenovat jako *laminární* (LMV). Poté lze její tloušťku vyjádřit jako:

$$\delta_{0,99} \approx 5,0 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot x}{\rho \cdot U}} \quad (2.6)$$

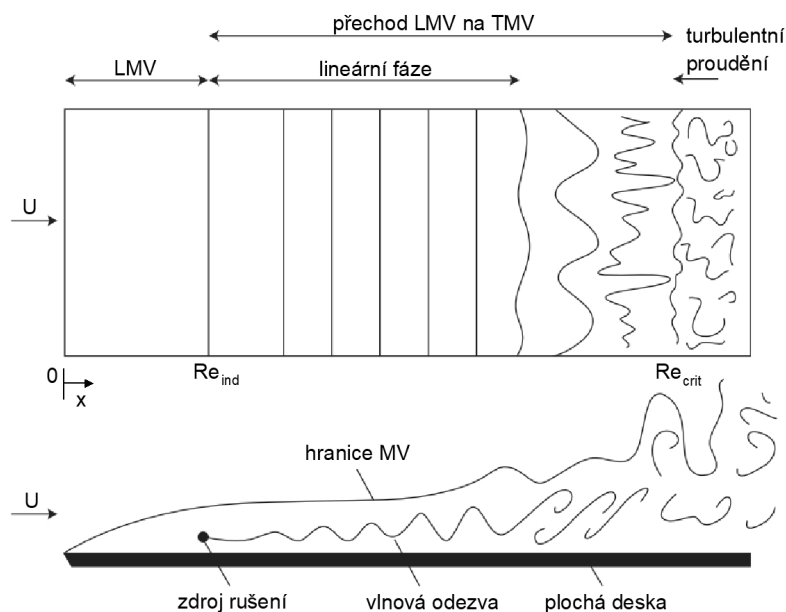
Z tohoto plyne, že MV narůstá také s rostoucím Reynoldsovým číslem, které v závislosti na vzdálenosti x po úpravě rovnice 2.4 odpovídá:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot x}{\eta} \quad (2.7)$$

Od určité vzdálenosti se režim mezní vrstvy změní, což je popsáno v kapitole 2.4.1. Vrstvy MV již nejsou uspořádané a všechny částice se nepohybují konstantní rychlostí. Dochází k náhodnému pohybu, víření a promíchávání předtím rovnoběžných vrstev, což je provázeno nárůstem smykového tření, odporu a tepelné výměny s okolím. Výpočet tloušťky TMV je komplikovaný a do této práce nebude zahrnut. Detailně je výpočet popsán v [28].

2.4.1 Přechod LMV na TMV

Tento fenomén nastává na povrchu tělesa při jeho obtékání vlivem významných či méně významných rušivých vlivů, které jsou propagovány a zesilovány po délce MV, viz Obr. 2.5. Pro zjednodušení lze považovat MV za nelineární oscilátor, který má za určitých počátečních podmínek lineární vlnovou odezvu na externí vstupy. Při testech ve větrných tunelech s nízkou intenzitou turbulence nebo při letu v nerušeném proudu lze pozorovat vznik několika fází. První z nich je přenos externího rušení a jeho konverze na vlny s nízkou amplitudou. Externí rušení může být tvořeno turbulencí přítomnou v okolním proudu, zvukovými vlnami, drsností povrchu, vibracemi apod. Jakmile je vlna vytvořena, je propagována mezní vrstvou dál po proudu a podle okolních podmínek buď narůstá, nebo zaniká. Při správných podmínkách pak dochází ke vzniku TMV. [12]



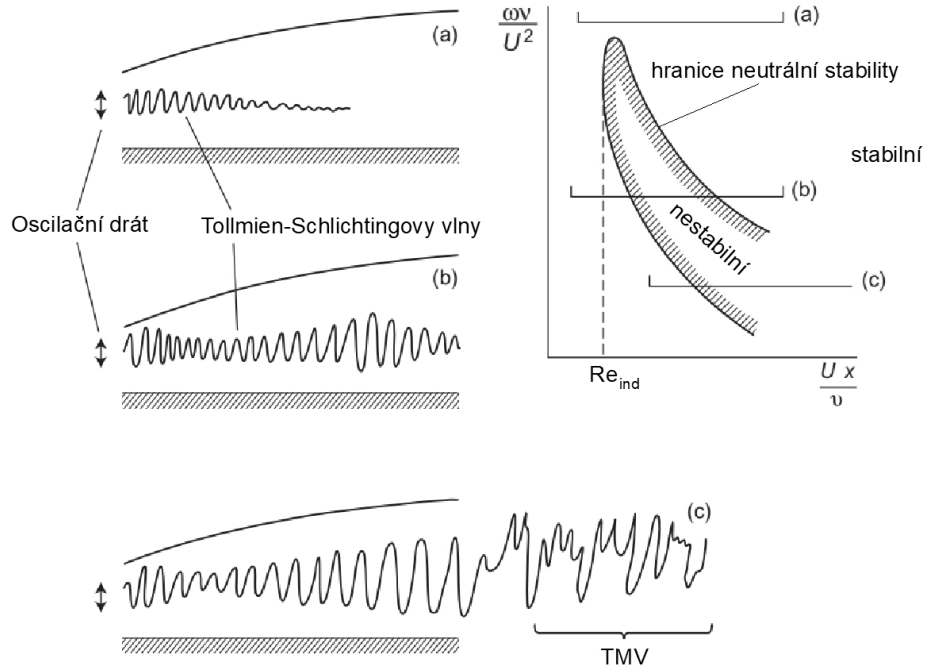
Obrázek 2.5: Schématické znázornění přechodu LMV na TMV se zdrojem rušení [12]

Vlny s nízkou amplitudou zůstávají převážně dvourozměrné, jejich popisem se zabývali L. Tollmien a H. Schlichting ([34] a [27]), podle kterých jsou pojmenovány. Tato lineární dvourozměrná část tvoří významný podíl z celkové délky přechodu LMV na TMV. Působením rušení o vyšších amplitudách je v dalších částech šíření postupně ztrácen dvourozměrný charakter vlny a MV nabývá na komplexnosti.

Zásadní prací, která umožnila další popis přechodu LMV na TMV, byl výzkum L. Prandtl a jeho týmu [22]. Prandtl popisuje, že viskozita nemá na šíření rušení z okolí pouze tlumivé účinky, ale také dodává oscilujícím částicím energii, čímž přispívá k nárůstu jejich amplitudy. Toto bylo následně potvrzeno experimentálně v [29].

Vzhledem k obtížnému řízení amplitudy okolního rušení byl do blízkosti povrchu umístěn drátový oscilátor, jehož frekvenci ω bylo možno měnit. Tlumení či zesilování bylo vyneseno do diagramu na obrázku 2.6 v závislosti Re_x (osa x) a frekvenci ω (osa y). Výsledky ukázaly, že v závislosti na hodnotě frekvence je možno sledovat tři druhy vývoje vlnové odezvy. První nastává při buzení rušení o vysoké frekvenci. Pro tento případ vždy dochází k utlumení, snižování amplitudy, propagované vlny a následně k jejímu zániku. Pro frekvence o středních hodnotách nastává tlumení, které se po uražení určité vzdálenosti mění v ze-

sílení a následně opět k tlumení a následný zánik vlny. Poslední možnost šíření je spojeno s nízkými frekvencemi oscilátoru. V tomto případě amplituda vlny narůstá až do ztráty dvourozměrného charakteru vlny a následného přechodu do turbulentního režimu. Z obrázku 2.6 je viditelné, že se při překročení hranice neutrální stability, resp. při průchodu oblastí ohraničenou touto hranicí, dochází k zesilování šíření nestabilit. Schlichting [28] uvádí, že pro velmi vysoká Reynoldsova čísla obě větve hranice nestability jsou do nuly.



Obrázek 2.6: Schématické znázornění vývoje vlny v závislosti na frekvenci oscilátoru, (a) buzení o vysoké frekvence, (b) buzení o střední frekvenci, (c) buzení o nízké frekvenci [12]

Z obrázku 2.6 je viditelné, že existuje hodnota frekvence a Reynoldsova čísla nacházející se na hranici neutrální stability. Pro toto Reynoldsovo číslo Schlichting [28] užívá označení *indiferentní* Re_{ind} , proto i tuto frekvenci nazveme stejně ω_{ind} . Pak platí, že emitované frekvence vyšší než ω_{ind} a Reynoldsova čísla nižší než Re_{ind} budou utlumeny viskózními efekty MV. Z obrázku 2.5 je viditelné, že hodnota Re_{ind} , po jejímž překročení dochází ke vzniku Tollmien-Schlichtingových vln, a hodnota Re_{crit} , po které dochází k přechodu na TMV, nejsou totožné. Hodnota indiferentního Reynoldsova čísla je podle [29]:

$$Re_{ind} = 2,8 \cdot 10^6 \quad (2.8)$$

a hodnota kritického Reynoldsova čísla je:

$$Re_{crit} = 3,9 \cdot 10^6. \quad (2.9)$$

Tyto hodnoty jsou vztaheny k nízkým hodnotám okolní intenzity turbulence IT . S rostoucí turbulencí se hodnoty liší, což je objasněno v kapitole 2.4.2. Podle [12] je se zvyšující se turbulencí nebo nárůstem drsnosti spojeno také zkracování vzdálenosti nutné k nárůstu amplitudy šířené vlny. U těles provozovaných ve vysoce turbulentním prostředí, např. u lopatek turbín, je možno Re_{ind} a Re_{crit} zredukovat na jednu hodnotu blízkou Re_{crit} . Toto zjednodušení je možno provést, jelikož v těchto případech dochází ke kompletnímu přeskočení lineární části přechodu. LMV tak okamžitě přechází na TMV.

2.4.2 Ovlivnění přechodu LMV na TMV

Pro možnost přesnějšího odhadu místa vzniku přechodu LMV na TMV je třeba zohlednit možnost ovlivnění mnohými faktory, které mohou vznikat v důsledku chodu sledovaného tělesa nebo jsou na něj šířeny z okolí. Mezi tyto faktory lze podle [9] zařadit:

- intenzita turbulence v tunelu,
- drsnost povrchu modelu,
- zakřivení povrchu,
- rozdíl teploty stěny a nabíhajícího proudu,
- přítomnost tlakových gradientů,
- hodnota Machova čísla
- nebo přítomnost vibrací.

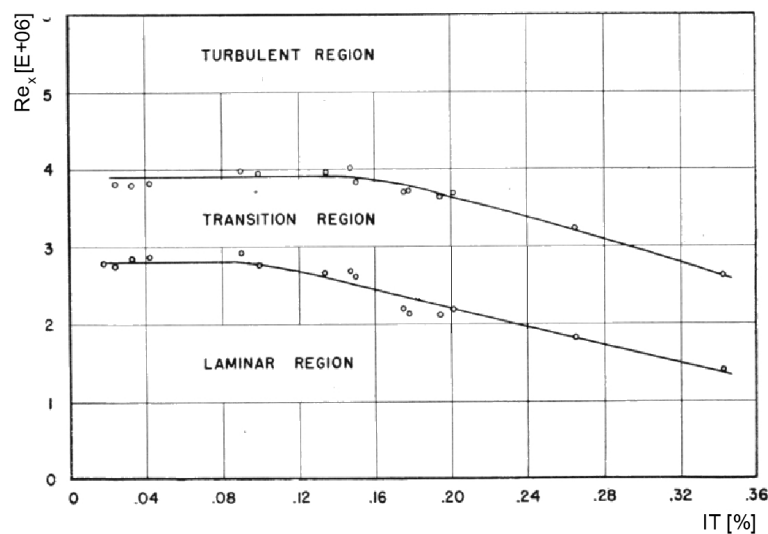
Některé ze zmíněných faktorů a jejich vliv na nastolení přechodu LMV na TMV budou blíže popsány pro možnost posouzení jejich vlivu na experimenty, viz kapitola 4.

Intenzita turbulence v tunelu je veličina označovaná jako IT . Její výpočet spočívá ve stanovení odchylek rychlosti ve všech osách kartézského souřadného systému, kterým odpovídá u' , v' a w' . Z těchto hodnot je následně vypočtena směrodatná odchylka a po vydělení střední hodnotou nerozrušeného proudu U_{mean} je získána intenzita turbulence:

$$IT = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(u'^2 + v'^2 + w'^2)}}{U_{mean}}. \quad (2.10)$$

Tento vzorec lze najít taky ve zjednodušené formě, např. v [5]:

$$IT = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_{mean}} \quad (2.11)$$



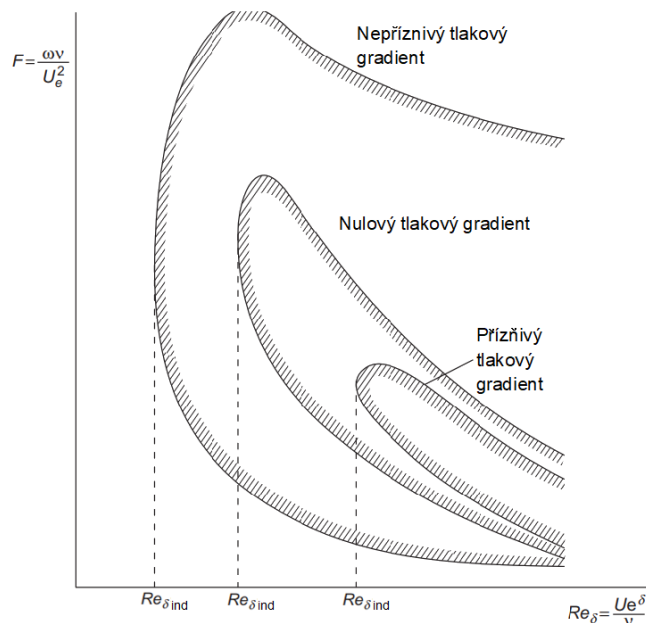
Obrázek 2.7: Vliv turbulence na přechod LMV na TMV [29]

Narůstající turbulence v měřicí sekci zvyšuje možnost vzniku přechodu LMV na TMV při nižších hodnotách Reynoldsova čísla, tento trend ilustruje Obr. 2.7. V grafu je možno sledovat, že po dosažení určité hodnoty snižování turbulence již nemá význam a rozmezí, kdy dochází k přechodu, se nemění. Tento diagram bude v experimentální části, viz Kap. 4.3, použit pro návrh rozměrů ploché desky.

Dalším z faktorů je **drsnost povrchu** modelu. Zde platí, že s rostoucí drsností povrchu klesá hodnota Reynoldsova čísla nutného pro přechod. Tohoto bývá podle [4] využíváno při nuceném přechodu LMV na TMV, např. za účelem zabránění nebo oddálení separace MV, viz Kap. 2.4.3, nebo fixace místa přechodu. Na povrch jsou aplikována rozličná zařízení, která ovlivňují proudění na povrchu. Tato zařízení jsou nazývána turbulátory a mohou mít podobu:

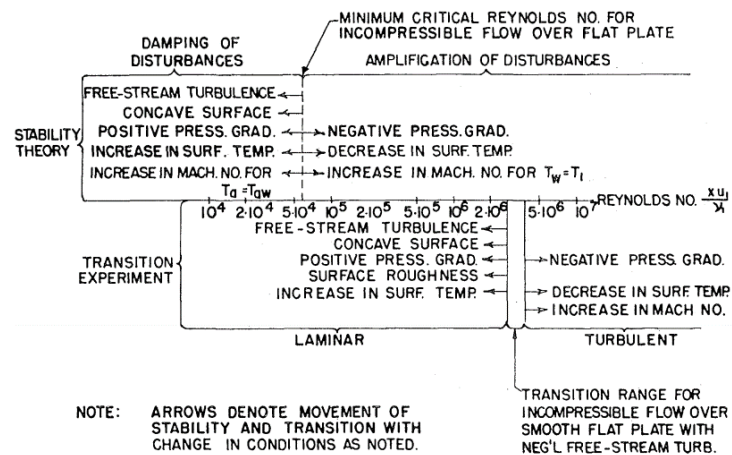
- úzkých pruhů smirkového papíru,
- drátků,
- lepicí pásky,
- nebo kapek lepidla.

Dále může být vznik přechodu ovlivněn **přítomností vnějšího tlakového gradientu**. Toto lze vysvětlit s použitím Tollmien-Schlichtingovy teorie popsané v 2.4.1. Typické ovlivnění od příznivého a nepříznivého tlakového gradientu je schématicky znázorněno na obrázku. S ohledem na teoretický základ je Re_x nahrazeno za Re_δ , které je kolmé na stěnu a závislé na tloušťce MV. Nicméně uvážíme-li, že tloušťka mezní vrstvy narůstá s průchodem okolo povrchu, je možno i o Re_δ uvažovat jako o vzdálenosti podél povrchu. U nepříznivého tlakového gradientu lze sledovat nejen pokles $Re_{\delta ind}$, ale také rozšíření zesilované oblasti.



Obrázek 2.8: Schématický diagram ovlivnění $Re_{\delta ind}$ v závislosti na přítomnosti tlakového gradientu [12]

Gazley se zaměřil na sepsání vlivů působících na snížení nebo nárůst počátečních hodnot Re_{ind} a Re_{crit} . Výsledek je ilustrován obrázkem 2.9.



Obrázek 2.9: Souhrn faktorů ovlivňujících přechod LMV na TMV [9]

2.4.3 Separace mezní vrstvy

Nebezpečí separace mezní vrstvy nastává v oblastech s vysokým tlakem. Čím je tlakový nárůst vyšší, tím je možnost separace výraznější. Toto platí zejména pro tělesa s tupou nebo náhle přerušenou odtokovou hranou.

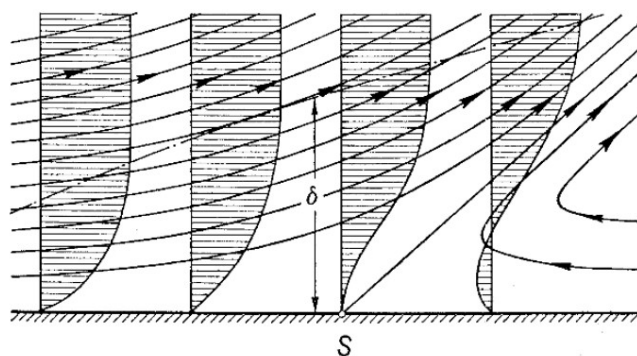
Během separace LMV dochází k vynesení proudnic mezní vrstvy z blízkosti povrchu do hlavního proudu. Tyto částice narazí na oblast se zvýšeným tlakem, jejíž hranici kvůli předchozímu zbrždění nemohou překročit, což vede k jejich odklonění a nárůstu tloušťky MV. Separací bod, který je na Obr. 2.10 označen jako S , je místo nacházející se na stěně a splňující podmínku nulového rychlostního gradientu kolmo na povrch:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_w = 0.$$

S čehož plyne nulové smykové napětí τ_w v bodě S . Zmíněná podmínka je popsána jako:

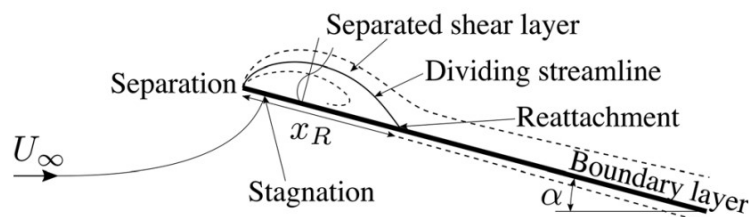
$$\tau_w = \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_w = 0.$$

Za bodem S se na rychlostním profilu objevuje inflexní bod, tedy dochází k otočení vektoru rychlosti a k recirkulaci proudění.



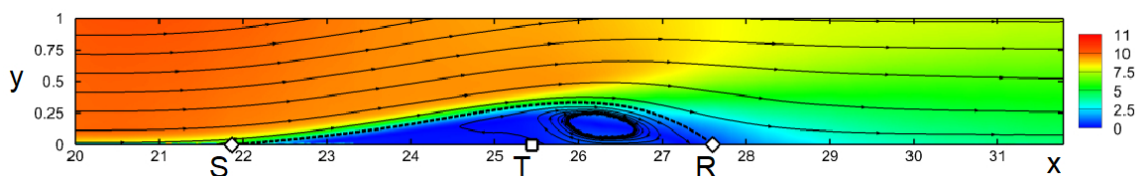
Obrázek 2.10: Schéma proudění v okolí separačního bodu [28]

Ke vzniku separace může dojít např. u obtékaných válců, profilů křídel, plochých desek nebo zpětných zrcátek automobilu, viz [18]. Separaci lze rozdělit na kompletní nebo s opětovným přilnutím. V druhém případě je na povrchu vytvořena separační bublina, která je vyplněna cirkulujícím proudem. Tato oblast je lemována MZ, která se v průběhu obtékání mění z LMV na TMV, která opět přilne k povrchu. Konkrétně vznikem a rozměry separačních bublin na náběžné hraně (NH) plochých desek s tupou NH se zabývá [32]. Schéma separační bubliny je znázorněno na obrázku 2.11.



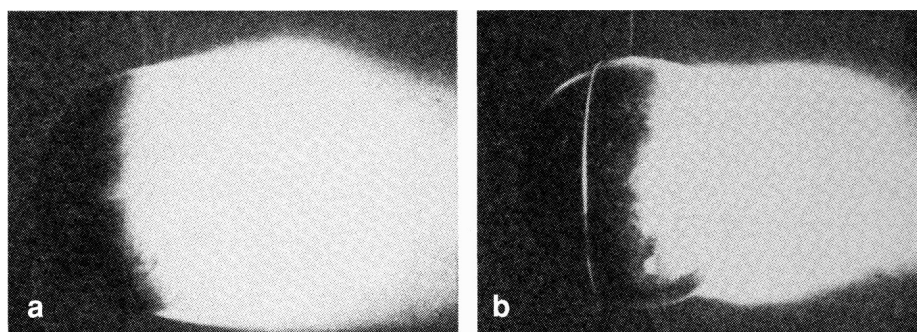
Obrázek 2.11: Schéma separační bubliny na NH ploché desky [32]

Simulací separační bubliny pomocí CFD se zabývá [5]. Součástí jeho práce je zobrazení rozložení rychlostí v separační bublině, viz Obr. 2.12. Ta vzniká na ploché desce působením profilu ležícího nad danou oblastí. Obrázek 2.12 zobrazuje pouze výšek se separační bublinou. Na osách jsou vyneseny bezrozměrné vzdálenosti, x od náběžné hrany a y od povrchu, které jsou vztaženy k referenční vzdálenosti $L_{ref} = 0,0254 \text{ m}$. Barevná škála symbolizuje bezrozměrnou rychlost, pro kterou je referenční rychlost $U_{ref} = 7 \text{ m/s}$. Body S a R ležící na ose x reprezentují separační bod a bod opětovného přilnutí MV. Tyto dva body jsou propojeny přerušovanou čarou, která odpovídá výsledku experimentu s využitím PIV. Bod T značí polohu x , ve které dochází k přechodu LMV na TMV. Tento bod je podle [12] spojen s největší výškou separační bubliny.



Obrázek 2.12: Simulace separační bubliny na ploché desce [5]

Dalším fenoménem spojeným se separací je režim MV při odtržení, který může být opět laminární nebo turbulentní. Významný přínos pro popis vlivu režimu separující se MV a s ním spojenou změnou odporu měla práce [7]. Zde bylo zmíněno, že u koule dochází k turbulentní separaci později, resp. dále po proudu, toto je způsobeno promícháváním v TMV a vyšším přísunem energie z okolního proudu než tomu je u LMV. Pro LMV se bod separace nachází v blízkosti rovníku, zatímco při odtrhávání TMV je posunut dále, což vede ke zúžení uplavu a poklesu součinitele odporu c_d . Toto bylo experimentálně ověřeno v [24]. Na povrch koule byl před rovník připevněn drát, který napomáhal ke změně režimu proudění z laminárního na turbulentní při nižších hodnotách Reynoldsova čísla. Na obrázku 2.13 je tento jev zobrazen za použití kouře. Levý obrázek ukazuje separaci LMV a široký uplav, který za koulí po separaci vzniká. Na pravém obrázku je experiment zopakován s připevněným drátem. Je viditelný posun separace a zúžení uplavu.



Obrázek 2.13: Vizualizace separace na kouli, (a) separace LMV (b) separace TMV [35]

Kapitola 3

Vizualizace proudění na povrchu těles

Podle [20] velikost a oblasti působení smykových sil, tlakových sil, ale také přenosu tepla spojených s účinky obtékání stěn tuhých těles byly a stále zůstávají předmětem mnoha studií. Pro tyto studie je velmi přínosné zobrazení proudění v blízkosti stěn tělesa nebo přímo na jejich povrchu. Metody mohou využívat mechanického, chemického nebo tepelného vlivu proudu. Obrazce vzniklé v důsledku interakce tělesa a proudu popisují např. rozložení tlaku, povrchového tření nebo směr proudění na vyšetřovaném povrchu. Dalšími veličinami, které mohou být sledovány, jsou přechod tepla nebo teplota povrchu.

Podle jejich charakteru lze metody rozdělit na invazivní a neinvazivní. Invazivní metody využívají k zobrazení cizího tělesa nebo látky aplikované na stěnu modelu nebo do nabíhajícího proudu. Tyto metody jsou již časem osvědčené a spolehlivé, ale v některých případech mohou být spojeny se znečištěním větrného tunelu nebo tekutiny v měřicím prostoru. Přítomnost sond či rozličných nátěrů lze také pozorovat na výsledcích měření v podobě ovlivnění přilehlého proudu.

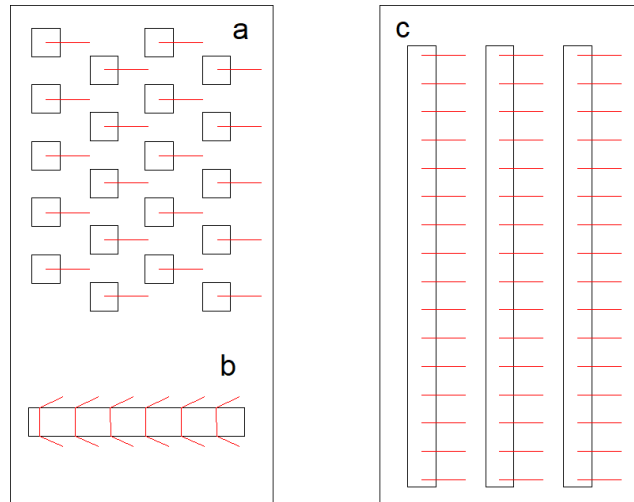
Pro vizualizaci za použití neinvazivních metod jsou využívány optické přístroje, které detekují změny v proudu např. Na základě teploty povrchu.

Odborná literatura pojednává o mnoha technikách pro zobrazení proudění. Pro účely této diplomové práce byly vybrány ty, které vizualizují proudění na povrchu modelu, nikoli v jeho okolí, a zároveň jsou teoreticky proveditelné v podmínkách Leteckého ústavu VUT.

3.1 Bavlnkové sondy

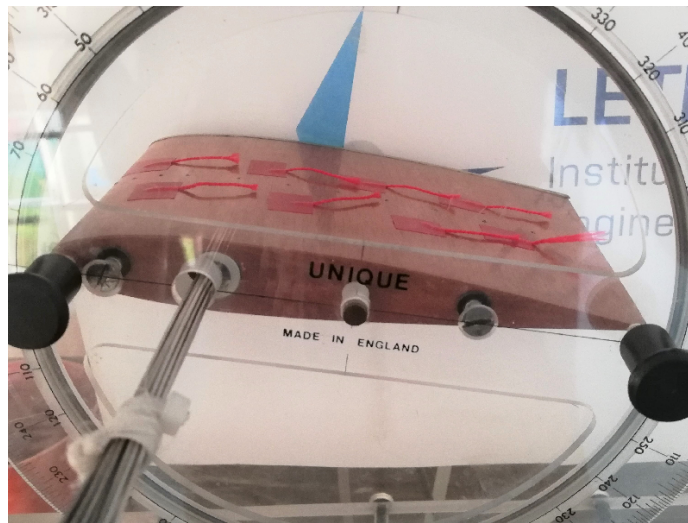
Mezi nejjednodušší a hojně využívaný způsob sledování proudění v blízkém okolí testovaného povrchu patří bavlnkové sondy. Metoda spočívá v připevnění bavlnek k povrchu tělesa, jejich volný konec je pak aerodynamickými silami unášen ve směru proudu, což přináší obraz o proudění v dané oblasti. Tímto způsobem je možno určit oblasti se stabilním či nestabilním prouděním. Identifikovány jsou regiony s kompletním odtržením a také regiony s opakovaným odtrháváním a následovným přiléháním proudu.

Materiál sondy by měl být lehký a flexibilní, aby co nejméně zkresloval působení nabíhajícího proudění. Lze využít nití určených pro textilní výrobu. Délka a hmotnost sondy se odvíjí od typu proudění, zejména pak jeho rychlosti. Pověštinou bývá použito větší množství bavlnek, které jsou na testovaný povrch umísťovány ve strukturovaných obrazcích, viz Obr. 3.1a, nebo lze využít předem připravených pásů, viz Obr. 3.1 b a c.



Obrázek 3.1: Uspořádání bavlnek [4]

Bavlnky mohou být k povrchu připevněny, buď za použití lepidla, nebo lepicí pásky, viz Obr. 3.2. Pohyb každé z bavlnek vypovídá o přilehlosti, nebo naopak o separaci či turbulenci proudění v daném kontrolním bodě. Tato metoda může do jisté míry ovlivňovat přilehlé proudění, pro zjištění úrovně ovlivnění lze odstranit předcházející řadu bavlnek, resp. tu nacházející se proti proudu. Během měření je pořizován fotografický nebo video záznam. [4]



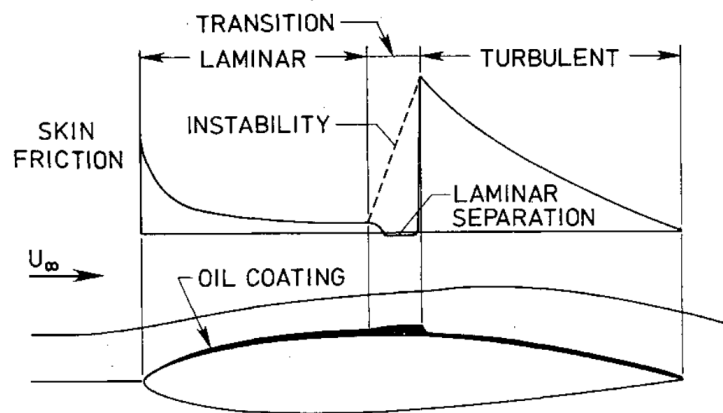
Obrázek 3.2: Bavlnkové sondy přilepené na profil lepicí páskou

Mini bavlnkové nebo vláknové sondy využívají stejného principu jako běžné bavlnkové sondy s tím rozdílem, že místo textilních nití nebo bavlnek jsou použity nylonová vlákna s fluorescenční úpravou. Průměr použitých vláken se pohybuje v hodnotách jednotek setin milimetru. Tímto je dosaženo nižšího ovlivnění proudění a vyšší citlivost na změny režimu proudění. V tomto případě jsou vlákna uchycována k povrchu výhradně s použitím lepidla, jelikož páska by zkreslovala výsledky měření. Při lepení je využíváno jehly, aby roz-

měry vzniklé kapky byly co nejmenší. Pro snadnou identifikaci teček lze do lepidla přimíchat fluorescenční látku. [4]

3.2 Olejový film

Pro vizualizaci proudění na povrchu tělesa lze použít také tenkou vrstvu oleje, který je na zkoumaný povrch nanášen štětcem bezprostředně před zahájením testu. Po zapnutí větrného tunelu je olej působením smykového napětí a gravitační síly, buď zachycen, nebo odnesen z povrchu. V oblastech, kde olejová vrstva setrvává, jsou přítomny nízké hodnoty povrchového tření, což odpovídá laminárnímu režimu mezní vrstvy. Naopak turbulentní mezní vrstva vykazuje vysoké hodnoty povrchového tření, což má za následek odplavení nebo zúžení olejového filmu. Zmíněný princip je schématicky znázorněn na Obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Schéma indikace typu proudění pomocí olejového filmu [21]

Pro vznik obrazců popisujících proudění v krátkém čase (ideálně desetiny sekundy), tak musí být působení nabíhajícího proudu dostatečně intenzivní. Vzniklé obrazce přinášejí informaci o směru proudění nebo jeho separaci, resp. znovu přichycení na povrchu modelu. [4]

Mezi zápory této metody patří ztráta vykresleného obrazce po vypnutí větrného tunelu, proto [30] doporučuje pořizování fotografického záznamu v průběhu experimentu. Podle [4], musí být v potaz brána také geometrie modelu, jelikož při rychlostech nižších než 160 km/h se objevuje problém s testováním vertikálních povrchů.

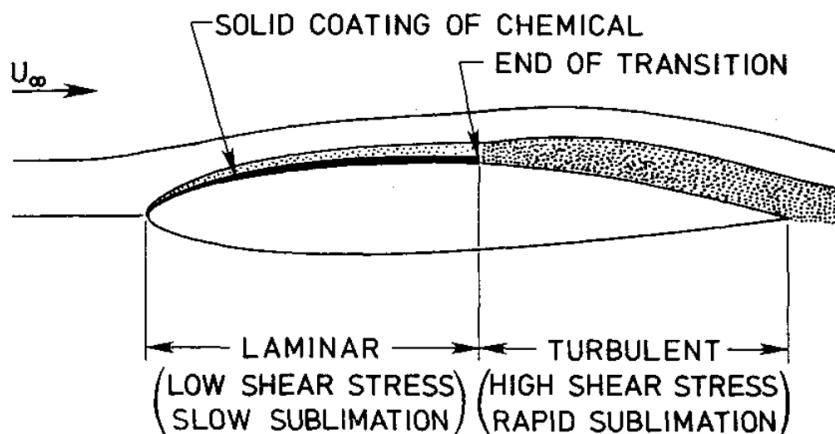
Viskozita oleje pro konkrétní rychlost proudění a daný model bývá zjišťována metodou pokus-omyl, s důrazem na zajištění tečení oleje při požadované rychlosti proudu. Nejčastěji bývají použity minerální oleje vyšší hustoty, které jsou dle potřeby ředěny naftou. Literatura [4] uvádí použití olejů SAE 60-70W, pro test při transsonických rychlostech byl dle [14] použit SAE 80-W-90. Za účelem zvýšení kontrastu mezi povrchem modelu a vrstvou oleje, lze do olejové směsi přidat fluorescenční složky, což je ukázáno na Obr. 3.4, nebo různé druhy barviv. Pro získání bílé barvy může být přimíchán TiO_2 , který je obchodně označován jako *titanová běloba*. Tmavé odstíny jsou pak zajištěny s použitím grafitového prachu.



Obrázek 3.4: Vizualizace za použití fluorescenčního olejového filmu [10]

3.3 Sublimační metoda

Během této metody je povrch modelu ošetřen chemickou vrstvou, která sublimuje působením okolního proudění. Literatura [8] udává, že nejčastěji je vizualizace za použití sublimační metody využívána pro určení přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní. Je využito rozdílného tepelně izolačního charakteru každé z vrstev, resp. v turbulentní mezní vrstvě je přítomna vyšší fluktuace proudění a dochází k vyššímu ohřevu povrchu. Což má za následek vyšší míru sublimace a vytvoření linie značící místo přechodu, viz Obr. 3.5.



Obrázek 3.5: Schéma přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní [21]

po ošetření je povrch většinou bílý a poskytuje vysoký kontrast s tmavými modely, přesto je možno ke změně barvy využít např. potravinářského barviva. Používané chemické sloučeniny a jejich molární hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Hodnota molární hmotnosti má vliv na míru sublimace a sloučeniny s vyššími hodnotami jsou používány pro vyšší testovací rychlosti. Vybraná sloučenina je následně rozpouštěna ve vysoce těkavé látce (např. v acetonu). Těkavost rozpouštědla je nutná s ohledem na techniku nanášení, tzv. "suché sprejování", (anglicky *dry-spraying*), kdy je roztok zvolené chemické sloučeniny rovnoměrně z dostatečné vzdálenosti rozprášen po povrchu. Ještě před

Tabulka 3.1: Uhlovodíky využívané pro vizualizaci [21]

Chemická sloučenina	Chemický vzorec	Molární hmotnost [g/mol]
Naftalen	$C_{10}H_8$	128,17
Bifenyl	$C_6H_5C_6H_5$	154,21
Acenaften	$C_{12}H_{10}$	154,21
Fluoren	$C_6H_4CH_2C_6H_4$	166,22

dopadem na povrch musí rozpouštědlo vyschnout, tak aby byla vytvořena souvislá a suchá vrstva. Ta je následně gumovou rukavicí očištěna od vrubů, které by mohli rozrušovat proudění.

3.4 Kaolín

Podobně jako u olejového filmu, i při vizualizaci za použití kaolínu je na povrch modelu štětcem nanášena suspenze kerosinu a částic kaolínu (či sazí). Opět musí k nátěru dojít těsně před spuštěním větrného tunelu, jelikož by mohlo dojít k předčasnému odpaření těkavého kerosinu, tudíž by obrazce pod vlivem proudu nevznikly. Test je ukončen po vyschnutí směsi a vzniklé obrazce mohou být blíže prozkoumány či nafoceny. Výsledek testu je zobrazen na Obr. 3.6. [4]

Aby bylo předejito zkreslení způsobenému fotografickým záznamem, doporučuje [31] uchování struktur vzniklých na modelu za použití průhledné lepicí pásky, takže při jeho přenášení nedochází k setření kaolínové vrstvy.

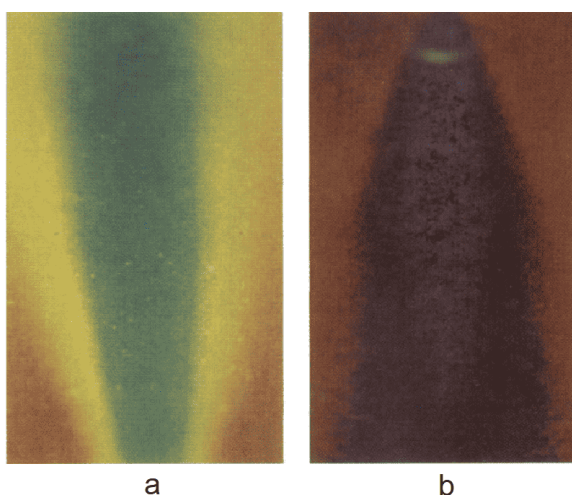
Nutno podotknout, že odpařování kerosinu představuje bezpečnostní riziko, jelikož vznikající páry by mohly být zapáleny jiskrami vznikajícími v elektromotoru. Proto je metoda považována za nevhodnou pro větrné tunely s uzavřeným oběhem.



Obrázek 3.6: Vizualizace za použití kaolínu [3]

3.5 Tekuté krystaly

Tato metoda využívá pro vizualizaci proudu tenké vrstvy tekutých krystalů, které jsou na povrch nanесeny za použití spreje. Po odpaření freonu, který figuruje jako rozpouštědlo, na povrchu modelu zůstává vrstva o tloušťce 10 – 20 μm . Tato vrstva po nasvícení bílým světlem a vystavení proudu mění své optické vlastnosti, tudíž mění barvu. Podle zobrazené barevné škály lze při daném úhlu nasvícení a daném pozorovacím úhlu určit směr nabíhajícího proudu a také hodnotu smykových napětí. Zobrazení za použití tekutých krystalů je zobrazeno na Obr. 3.7, kde byl zobrazen proud vycházející z trysky tečně k povrchu. Část *a* vykresluje spektrum barev zobrazovaných při pohledu ve směru proudu, zatímco *b* ukazuje pohled proti proudu. Nutno dodat, že existuje více druhů tekutých krystalů, přičemž každý z druhů je vhodný pro zobrazení určitého rozsahu smykových napětí. V porovnání s jinými metodami je velkou výhodou této metody, že její odezva je kontinuální a téměř okamžitá. [25]



Obrázek 3.7: Zobrazení za použití vrstvy tekutých krystalů [25]

3.6 Termovizní metoda

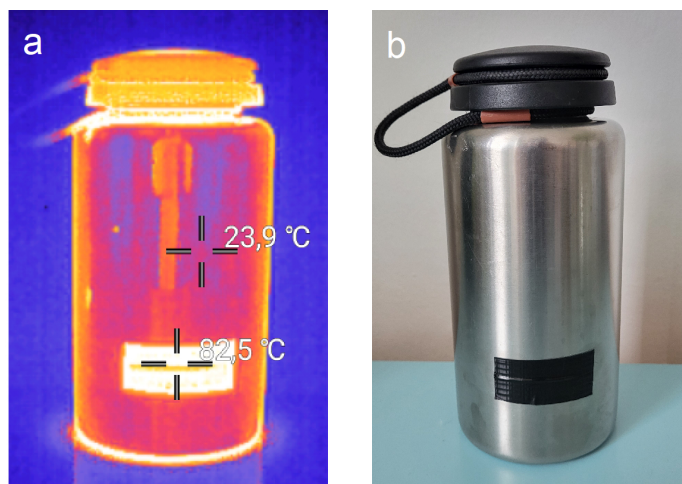
Termovizní nebo infračervené kamery slouží k určení teploty povrchu těles. K tomu je využíváno snímání a vyhodnocování energie vyzářené pozorovaným tělesem. Zásadní vliv na přesné určení teploty povrchu má vlastnost nazývaná emisivita ϵ , která udává poměr mezi energií vyzářenou černým tělesem, resp. dokonalým zářičem a reálným tělesem při stejné teplotě a dané vlnové délce. Další veličinou popisující povrch je odrazivost ψ , která udává poměr mezi dopadajícím a odraženým zářením. Obě zmíněné veličiny jsou bezrozměrné a nabývají hodnot od 0 do 1. Podle [15] lze vztah mezi emisivitou a odrazivostí pro tělesa nepropouštějící záření vyjádřit následovně:

$$\epsilon = 1 - \psi. \quad (3.1)$$

na hodnotu emisivity povrchu mají vliv jeho barva, drsnost, lesk a další faktory. Obecně platí, že tmavé a drsné povrchy se vyznačují vyšší emisivitou, což vede ke snadnějšímu měření jejich teploty.

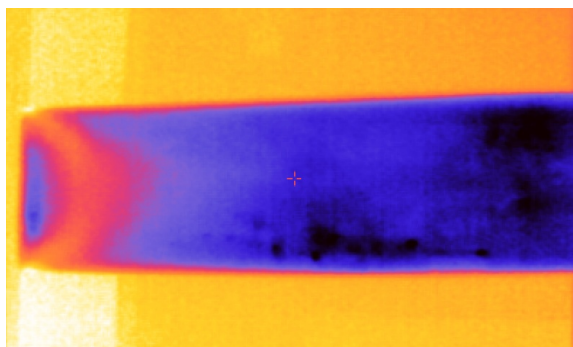
Pro ukázkou tohoto rozdílu byla do lesklé ocelové láhve s pruhem tmavé pásky nalita horká voda. Poté byl termokamerou s emisivitou nastavenou na 0,9 pořízen snímek, viz Obr.

3.8a. Mezi místem s nalepenou páskou a zbytkem lahve je podle měření velký teplotní rozdíl, přestože ve skutečnosti tomu tak není. Příčinou této chyby je právě vysoká odrazivost lesklého povrchu. Použitou sestavu zobrazenou ve viditelném spektru reprezentuje Obr. 3.8b.



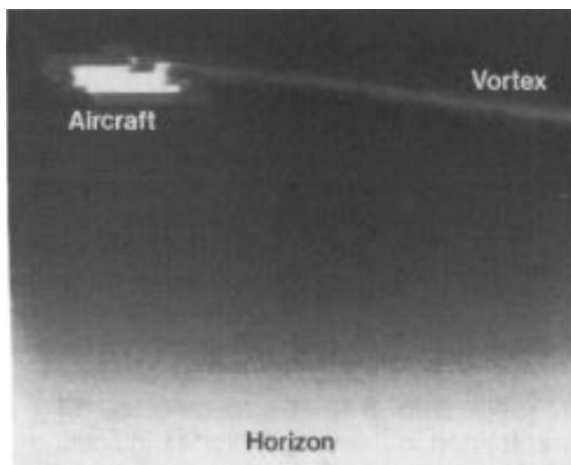
Obrázek 3.8: Zobrazení rozdílu teploty v závislosti na emisivitě povrchu, (a) termovizní snímek povrchu s rozdílnou hodnotou emisivity, (b) fotografie experimentální sestavy

Během měření v aerodynamickém tunelu nebo za letu je možno využít termovizní metody k vizualizaci přechodu LMV na TMV, což popisuje [13] a také [6]. Dle [4] je základním předpokladem pro fungování této metody existence teplotního gradientu zajišťujícího přestup tepla mezi stěnou a nabíhající proudem. Pokud je přítomen rozdíl teplot, v oblastech s turbulentním režimem mezní vrstvy lze pozorovat rychlejší tepelnou výměnu, resp. rychlejší ochlazování či ohřev. Laminární mezní vrstva přispívá k pomalejšímu přestupu tepla a proto napomáhá k udržení počáteční teploty tělesa.



Obrázek 3.9: Zobrazení za použití termovizní metody

Zajímavostí je, že přes primární použití pro zobrazení teploty povrchu byla termovizní kamera uplatněna také při vizualizaci koncových vírů letícího letounu, o čemž pojednává [19]. Za tímto účelem byl letoun vybaven potrubím, které vedlo napříč křídlem (ze zásobníku plynu do konce křídla). Tímto potrubím byl během letu vypouštěn plyn SF_6 , který se kvůli svým emisním vlastnostem jevil na termovizních snímcích jako teplejší než okolí. Díky tomu bylo možno sledovat vývoj a rozpad koncového víru po průletu letounu, viz Obr. 3.10.



Obrázek 3.10: Vizualizace koncového víru za letounem [19]

3.7 Výběr vizualizační metody

Z rešeršní části byl udělán souhrn vlastností pro každou ze zobrazovacích metod. Budou rekapitulovány důležité vlastnosti každé z metod a jejich aplikovatelnost pro zobrazení přechodu LMV na TMV.

Bavlnkové sondy jsou ekonomicky nenáročné, snadno dostupné a jednoduše aplikovatelné. S jejich použitím je možno zobrazit přilehlé proudění a jeho směr. Dobře slouží také jako prostředek pro detekování oblastí s održeným proudem. Fyzická přítomnost na stěně modelu však působí rušivě na přilehlé vrstvy proudu a tím může ovlivňovat výsledky měření. Zároveň nejsou schopny odhalovat přechod LMV na TMV, proto byly bavlnkové či vláknové sondy shledány nevhodnými pro použití v této práci.

Vizualizace olejovým filmem je dlouho používanou metodou, která napomáhá k zobrazení směru proudu na povrchu tělesa, separace proudění, separačních bublin, či přechodu LMV na TMV. Jedná se však o metodu invazivní, která je spojena se znečištěním modelu a v některých případech i samotné měřicí sekce. Přesto byl tento způsob vizualizace zvolen jako ověřovací pro experimentální část.

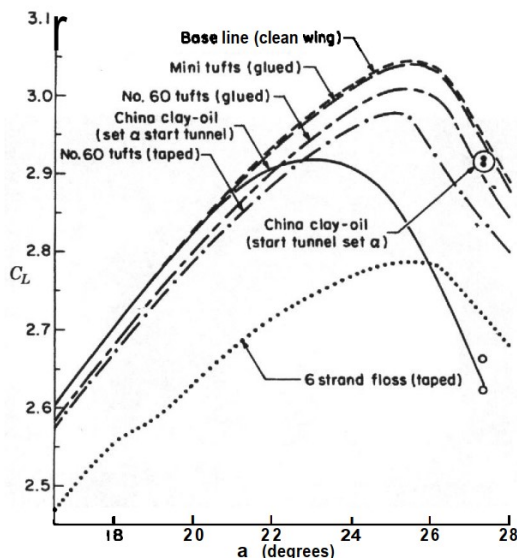
Sublimační metoda spočívá v nanesení tenké vrstvy uhlovodíku na zkoumaný povrch. Hranice nanesené látky dává po vystavení proudu informaci o poloze přechodu LMV na TMV. Používané látky jsou hořlavé či zdraví škodlivé, což brání v použití sublimační metody při následujícím testu.

Kaolín je založený na odpaření těkavé látky nesoucí drobné částice jílu či sazí, ty se pohybují ve směru přilehlého proudu, tím dávají informaci o směru proudu. Tímto způsobem je možno odhalit i přechod LMV na TMV, avšak použití těkavých kapalin není v souladu s předpokladem bezpečnosti metody. Z tohoto důvodu metoda nebyla vybrána pro experiment.

Tekuté krystaly dávají informaci o teplotě povrchu, tudíž je při aplikaci na správná místa lze použít pro odhalení přechodu LMV na TMV. Jsou však na běžném trhu nedostupné, což zabránilo jejich použití při experimentu.

Termografická metoda je neinvazivní bezpečná vizualizační metoda využívající zobrazení teploty povrchu tělesa. S jejím použitím je možno zobrazit přechod LMV na TMV. S ohledem na jeho vlastnosti byl tento způsob vizualizace zvolen pro použití při experimentu.

Nežádoucí vliv jednotlivých metod je porovnán na základě změny vztlakových čar, viz Obr. 3.11. Z obrázku je patrné, že k nejmenšímu ovlivnění dochází při použití nylonových sond přilepených lepidlem. Naopak nejhůře se projevují bavlnkové sondy přilepené lepicí páskou.



Obrázek 3.11: Ovlivnění vztlaku jednotlivými metodami [4]

Metoda nebo metody vybrané pro experimentální testování by měly být:

- proveditelné ve větrném tunelu Leteckého ústavu VUT,
- bezpečné (nepředstavují bezpečnostní riziko),
- časem ověřené,
- pokud možno neinvazivní.

Pro přehlednost byla z výše uvedených a dalších kritérií vytvořena tabulka 3.2. Vyšší hodnocení značí, že daná metoda lépe odpovídá požadavkům. Zelená políčka značí nejlepší výsledky v dané kategorii, s červenými je tomu naopak. Hodnoty v tabulce jsou založeny na subjektivním hodnocení na základě informací poskytovaných v citované literatuře.

Tabulka 3.2: Hodnocení vizualizačních metod

Metoda/Vlastnosti	Finanční nákladnost	Rychlost aplikace	Nenáročnost	Bezpečnost	Zobrazení přechodu LMV na TMV	Neovlivnění přechodu
Bavlnky	100	60	90	100	0	0
Olejový film	100	40	70	100	90	90
Sublimační metoda	80	30	20	20	100	90
Kaolín	100	40	60	20	90	90
Tekuté krystaly	-	50	10	100	100	90
Termografie	70	70	60	100	90	100

S ohledem na jednoduchost provedení a schopnost jednotlivých metod odhalit přechod režimu mezní vrstvy byla vybrána zobrazovací metoda s použitím termovizní kamery. Metoda olejového filmu pak byla vybrána pro možnost porovnání výsledků.

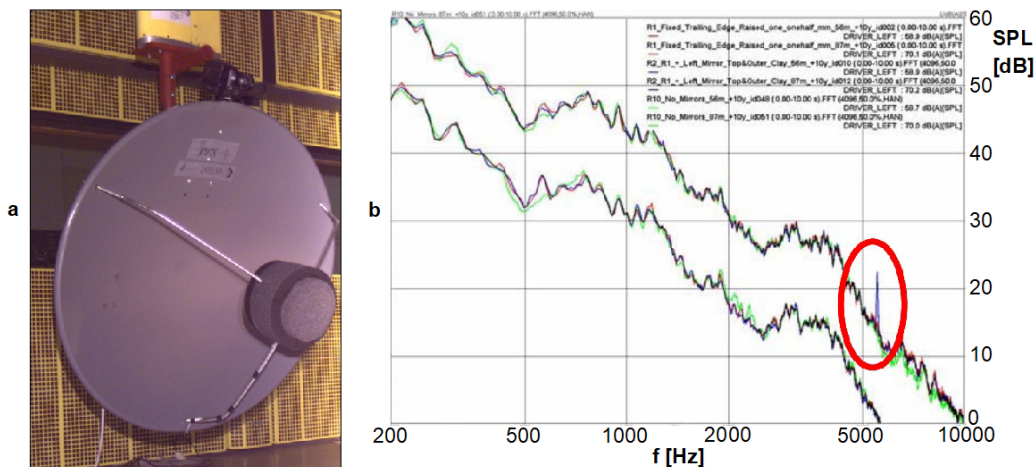
Kapitola 4

Experimentální část

Tato kapitola popisuje současný stav testování automobilů s ohledem na zjištění příčiny vzniku nežádoucího vysokofrekvenčního hluku. Dále je uvedeno vybavení použité při experimentálních testech, které byly provedeny během psaní této diplomové práce. Před každým z měření je popsán použitý model a jev, který by měl nastat při zvolené rychlosti. Jsou uvedeny parametry a výsledky jednotlivých měření a jejich vyhodnocení.

4.1 Současný stav

V současné době je v automobilovém průmyslu pro identifikaci vysokofrekvenčního hluku v podobě „pískání“¹ používáno akustické zrcadlo, viz Obr. 4.1a. Zrcadlo se skládá z parabolické odrazné plochy a mikrofону, který snímá hladinu intenzity SPL a frekvenci f vznikajícího v prověřované oblasti. Na výsledných diagramech je pískání znázorněno lokálními špičkami SPL , viz diagramy na Obr. 4.1. Měření s akustickým zrcadlem bývá spojeno se značnou náročností a složitostí přípravy, což snižuje rychlost testů a zvyšuje konečné náklady společnosti.



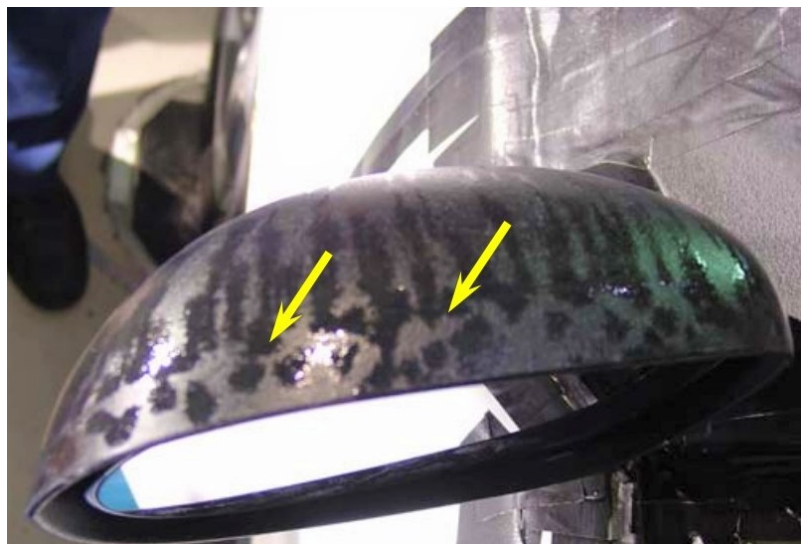
Obrázek 4.1:

a: Akustické zrcadlo [11]

b: Výsledky analýzy generovaného hluku [18]

¹V zahraniční literatuře je tento jev dohledatelný pod názvem *laminar flow whistle*.

Pro bližší lokalizaci místa odtržení proudu, které může být příčinou pískání, je pak využíváno metody olejového filmu. Výsledek testu je znázorněn na Obr. 4.2, kde je hranice odtržení znázorněna kumulací oleje před oblastí s nárůstem tlaku. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tato metoda je spojena s obtížemi v podobě znečištění měřicí sekce a nutností čištění povrchu před a hlavně po zkoušce. Proces testu s použitím akustického zrcadla a olejového filmu je popsán v [18].



Obrázek 4.2: Výsledky testu s použitím olejového filmu [18]

4.2 Vybavení a metodika

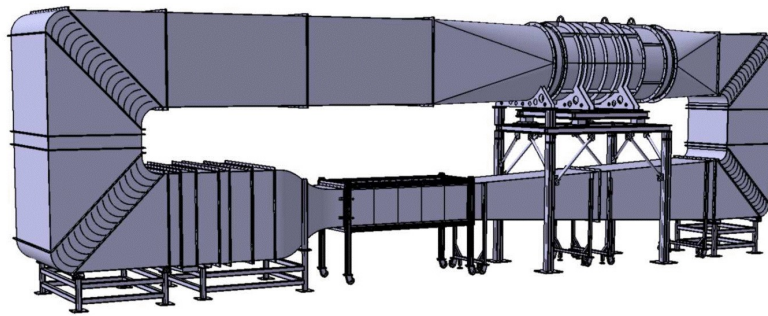
V této části je popsáno vybavení použité při testech a způsob provádění každého z testů. Zmíněn je také způsob snímání výsledků testu a technické úpravy s ním spojené.

4.2.1 Větrný tunel

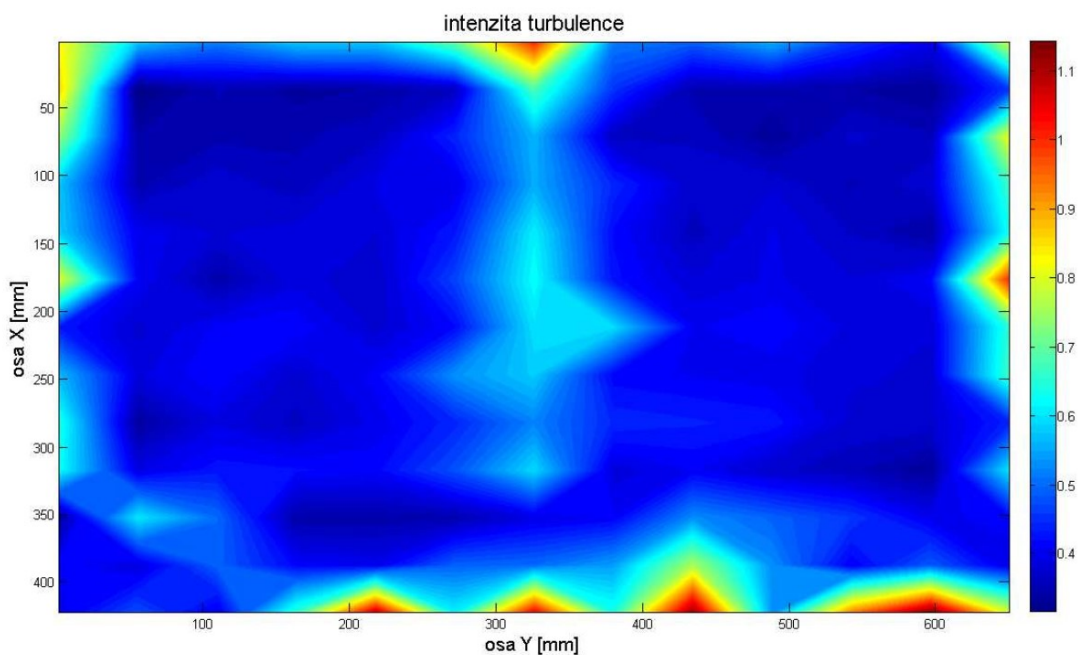
Pro provedení experimentu byl s ohledem na dostupnost zvolen větrný tunel Leteckého ústavu VUT, viz Obr. 4.3. Jedná se o tunel s uzavřeným oběhem, který byl pro účel experimentu osazen uzavřenou měřicí sekci o rozměrech 500x700x2000 mm. Větrné tunely s uzavřeným oběhem jsou oproti tunelům s otevřeným oběhem energeticky méně náročné, jelikož uchovávají část hybnosti hnaného vzduchu. Vlivem tření v měřicí trati však dochází k ohřevu vzduchu, a proto je pro uchování konstantní teploty potřeba vzduch ochlazovat. Větrný tunel LÚ je vybaven integrovaným chladicím systémem, ten však v době provádění experimentu nebyl provozuschopný, proto teplota proudu T_{ok} kolísala mezi hodnotami:

$$T_{ok} = 22 - 26 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Podle [17] je maximální dosažitelná rychlost proudění v tunelu s prázdnou měřicí sekci 60m/s a intenzita turbulence odpovídá $IT = 0,33 \%$. Podle rozložení intenzity turbulence napříč měřicí sekci, viz Obr.4.4, je však patrné, že ve střední části tunelu je přítomna $IT = 0,6 \%$.



Obrázek 4.3: Měřicí trať větrného tunelu LÚ [17]



Obrázek 4.4: Intenzita turbulence v měřicí sekci [17]

Pro snadnější kalibraci zvolených metod bylo vybráno více modelů (plochá deska a válcová trubka). U těchto modelů by mělo být možno teoreticky vyčíslit hodnoty rychlostí, při kterých dochází k požadovaným jevům. Následně byly obě metody použity při testování zpětného zrcátka. V dalších podkapitolách budou podrobněji popsány vybrané metody a použité příslušenství.

4.2.2 Oilflow

Za účelem provedení vizualizace s použitím olejového filmu byly zvoleny dva různé druhy olejů. Jedním byl syntetický převodový olej s označením W75, který byl pro zvýšení kontrastu obarven titanovou bělobou a pro snížení viskozity smíchan s naftou v poměru 2:1 (olej:nafta). Ten byl použit na modelech s tmavým povrchem. Jako druhý byl zvolen odpadní olej z motoru automobilu, jelikož se vyznačuje tmavou barvou způsobenou vysokou koncentrací

drobných nečistot. U tohoto oleje nebylo možno určit hodnotu viskozity, jelikož byl smíchán z více různých automobilů. Odpadní motorový olej byl použit na modelech se světlým povrchem a byl zředěn naftou v poměru 1:2 (olej:nafta).

Každý z modelů byl před testem očištěn od hrubých nečistot a následně odmaštěn technickým lihem. Poté byla na povrch štětcem nanесena tenká vrstva oleje a spuštěn větrný tunel. Po rozběhnutí větrného tunelu na požadovanou rychlost, což trvá přibližně 10 s, následovalo cca 10 – 40 s tečení oleje a vykreslení obrazců. Celý experiment byl zaznamenáván na kameru umístěnou nad měřicí sekci.

4.2.3 Termovizní metoda

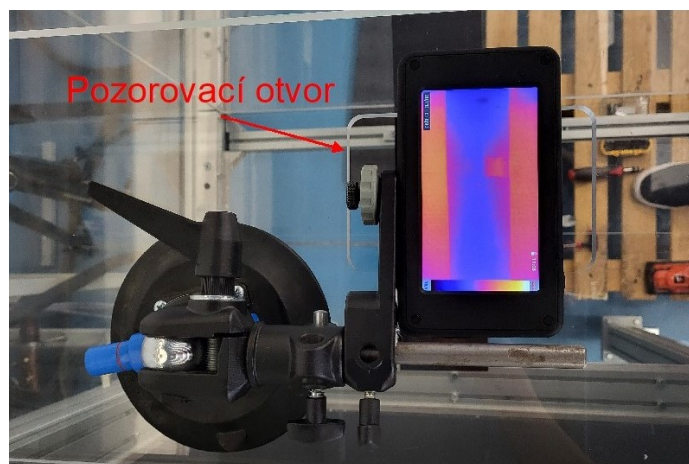
Během experimentu byla použita kapesní termovizní kamera TE-SQ1, jejíž parametry jsou uvedeny v Tab. 4.1. Nutno poukázat na značnou chybu měření, která je udávána jako $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, a tudíž může měření zatěžovat určitou mírou nejistoty. Nicméně literatura [13] zabývající se problematikou vizualizace přechodu LMV na TMV udává použití termovizní kamery s chybou měření $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Jelikož zmíněný výzkum dosáhl uspokojivých výsledků, byla i termokamera TE-SQ1 shledána vhodnou. Při testu není nezbytné přesné určení teploty, ale spíše vysoká citlivost na její změnu, tuto hodnotu však výrobce neuvádí. Emisivita byla pro všechna měření nastavena na 0,9.

Tabulka 4.1: Specifikace TE-SQ1 [2]

Detektor	Mikro-Bolometr
Spektrální rozsah	8 – 14 μm
Snímkovací frekvence	9 Hz
Teplotní rozsah	-40 – 350 $^\circ\text{C}$
Chyba měření	0 – 100 $^\circ\text{C}$: $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, 100 – 350 $^\circ\text{C}$: $\pm 3 \%$

Za účelem získání teplotního gradientu mezi stěnou a proudem byly modely chlazeny či zahřáty, což bude popsáno v částech popisujících výsledky pro každý z modelů. Obecně však teploty modelů nebyly udržovány na konstantní hodnotě. Cílem bylo pouze vytvoření teplotního rozdílu s okolím. Následně byl stejně jako při metodě olejového filmu spuštěn větrný tunel a po 10 – 40 s byl pořízen snímek.

Jelikož většina běžných plexisklových materiálů nepropouští infračervené záření, byl pro možnost snímání povrchu do stěny tvořící měřicí sekci vyříznut pozorovací otvor, viz Obr. 4.5.



Obrázek 4.5: Uchycení termovizní kamery

4.3 Plochá deska

Tento model byl vybrán z důvodu existence mnoha předešlých experimentů popisujících chování MV a přechodu LMV na TMV. S použitím literatury citované v podkapitole 2.4.1 a 2.4.2 tak lze získat odhad parametrů modelu a měření, při kterých by měl nastat přechod LMV na TMV. Pro návrh modelu ploché desky byl použit diagram 2.7, ze kterého byl v závislosti na IT stanoven odhad pro Reynoldsova čísla přechodu:

$$Re_{ind} = 1,5 \cdot 10^6$$

$$Re_{ind} = 2,8 \cdot 10^6.$$

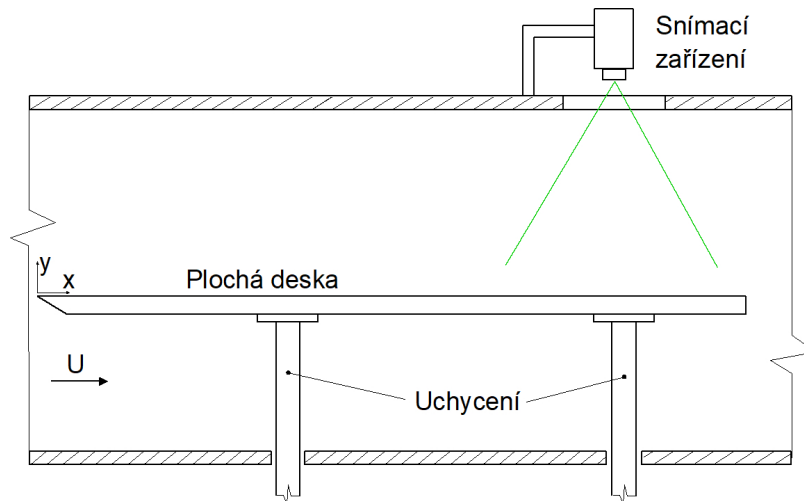
Tento interval byl porovnán s diagramem 2.9 a byl posouzen za korektní pro další výpočty. Dále byla s použitím [1] zjištěna kinematická viskozita vzduchu při teplotě $T_{ok} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\nu = 1,54 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}},$$

tato teplota byla zvolena s ohledem na ohřev vzduchu v měřicí sekci. Poté byla na základě dosažitelných rychlostí proudu, kinematické viskozity a Re_{ind} z rovnice 2.4 empiricky získána vhodná délka desky:

$$l = 1,40 \text{ m}.$$

Následně byl stanoven rozsah měřených rychlostí a Reynoldsova čísla pro sledovanou oblast nacházející se v rozmezí $x = 1,1 - 1,3 \text{ m}$, viz Tab. 4.2. Interval měřených rychlostí byl rozšířen s ohledem na kolísání teploty proudu a přítomnost neznámých tlakových gradientů. Ty provázely měření v důsledku způsobu snímání a uchycení modelu, což je znázorněno na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Schéma uchycení modelu

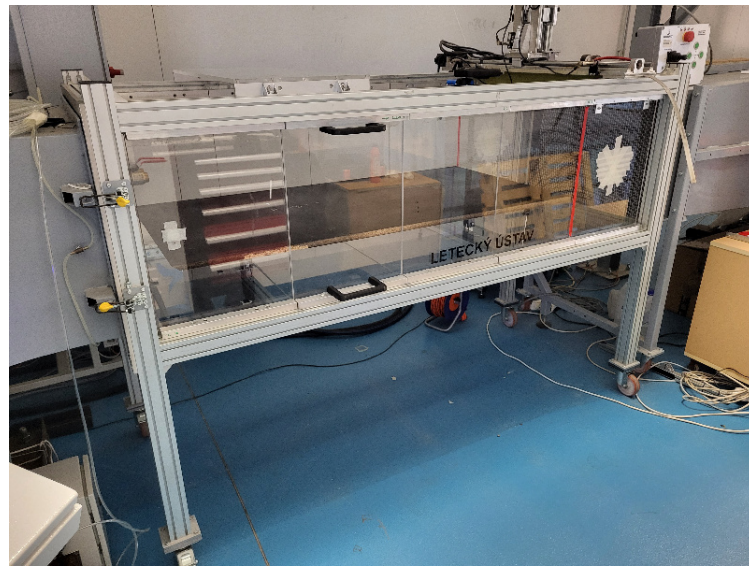
Jak je patrné z obrázku 4.6, náběžná hrana byla pro zlepšení nabíhání nerušeného proudu seříznuta pod úhlem $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Šířka desky odpovídala 685 mm , tak aby z většiny vyplňovala prostor měřicí sekce, viz Obr. 4.7, a bylo pokud možno zamezeno vzniku koncových

vírů při zachování možnosti pohodlné montáže. Jako materiál pro výrobu byla zvolena laminovaná dřevotříska s velmi hladkým povrchem, který byl pro zvýšení emisivity nabarven na černo.

Tabulka 4.2: Rozsah měřených rychlostí a odpovídající Re_x

$Re [1 \cdot 10^6]/U [m/s]$	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$Re_{x=1,1} m$	1,35	1,43	1,50	1,57	1,64	1,71	1,78	1,85	1,92
$Re_{x=1,2} m$	1,48	1,56	1,63	1,71	1,79	1,87	1,94	2,02	2,10
$Re_{x=1,3} m$	1,60	1,69	1,77	1,85	1,94	2,02	2,11	2,19	2,27

$Re [1 \cdot 10^6]/U [m/s]$	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$Re_{x=1,1} m$	2,00	2,07	2,14	2,21	2,28	2,35	2,42	2,50	2,57
$Re_{x=1,2} m$	2,18	2,26	2,33	2,41	2,49	2,57	2,64	2,72	2,80
$Re_{x=1,3} m$	2,36	2,44	2,53	2,61	2,70	2,78	2,86	2,95	3,03

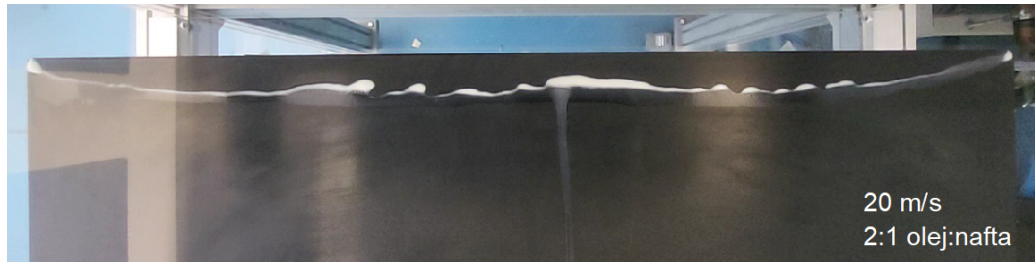


Obrázek 4.7: Foto měřicí sekce s nainstalovanou plochou deskou

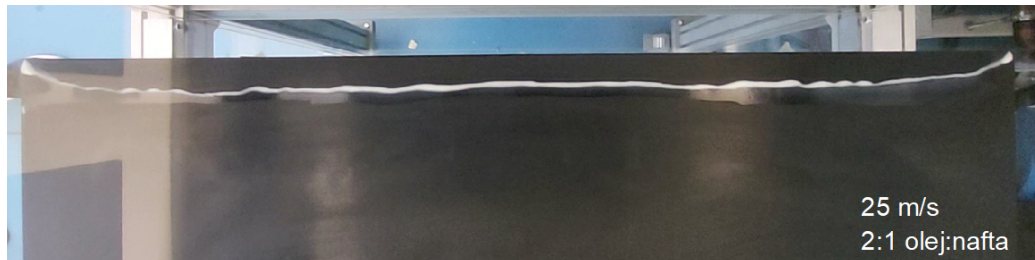
po provedení měření podle testovacího plánu, viz Tab. 4.2, nebyl ani jednou z metod pozorován vznik přechodu LMV na TMV. Pro vyvrácení přítomnosti přechodu v jiné než pozorované oblasti bylo po celé délce desky provedeno měření za použití metody olejového filmu. Pro každou z rychlostí byla po délce desky nanesena tenká stužka oleje a byla sledována její odezva. S výjimkou náběžné hrany nedocházelo v žádné oblasti ke kumulaci oleje. Proto byla s použitím obou metod prozkoumána oblast v okolí náběžné hrany (NH). Rychlosti testů jsou uvedeny v tabulce 4.3 a odpovídající snímky znázorněny obrázkem 4.8.

Tabulka 4.3: Rychlosti měření pro inspekci náběžné hrany

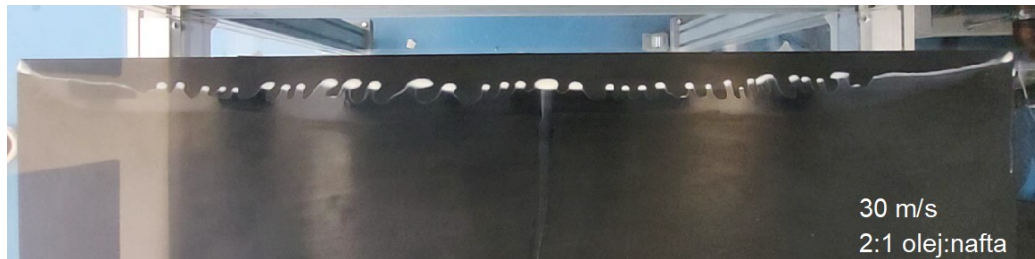
Č. měření	U [m/s]
1.	20
2.	25
3.	30
4.	35



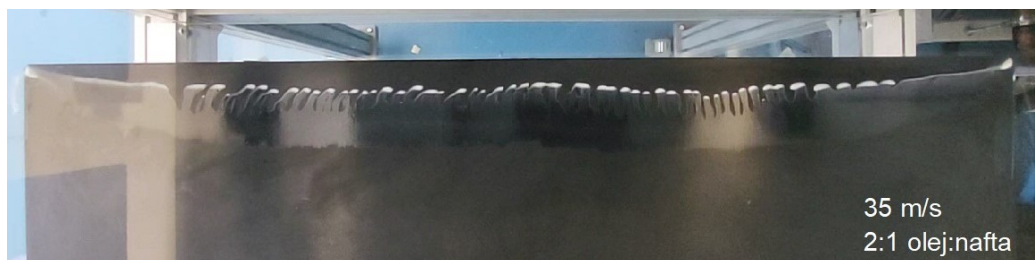
(a) $U = 20 \frac{m}{s}$



(b) $U = 25 \frac{m}{s}$



(c) $U = 30 \frac{m}{s}$



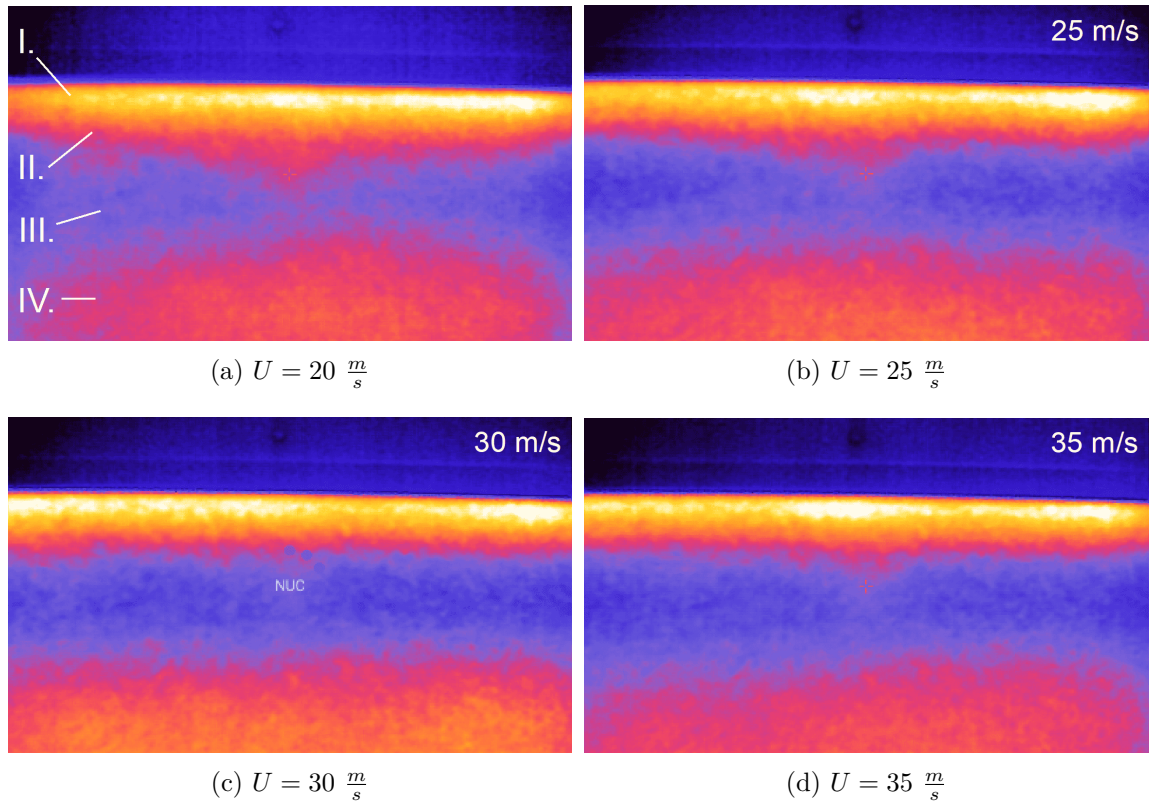
(d) $U = 35 \frac{m}{s}$

Obrázek 4.8: Okolí náběžné hrany s použitím olejového filmu

Olej nanesený na povrch ve středu desky se do vzdálenosti přibližně $x \approx 0,07 \text{ m}$ vrací zpět k náběžné hraně, kde následně zhruba v $x \approx 0,02 \text{ m}$ ulpívá. Za $x \approx 0,07 \text{ m}$ olej stékal ve směru proudu. Toto vedlo k myšlence, že na náběžné hraně dochází k separaci

proudu, který následně ve vzdálenosti $x \approx 0,07 \text{ m}$ opět přilne k povrchu. Kapky jsou recirkulací odnášeny do polohy s nulovou rychlostí, která odpovídá $x \approx 0,02 \text{ m}$. Po studii [5] a [32] byl učiněn závěr, že za NH dochází ke vzniku separační bubliny. Ta má vlivem koncových vírů obloukový tvar. Za separační bublinou dochází k přilnutí TMV, což nejspíše způsobilo absenci přechodu LMV na TMV v zadní části desky. Vznik separační bubliny byl pravděpodobně zapříčiněn drobnou odchylkou v nastavení úhlu náběhu desky, která byla $+0,1^\circ$. Další potenciální možností je příliš malý úhel seříznutí NH.

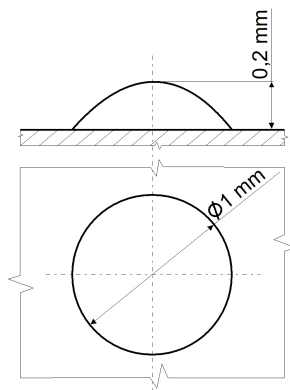
Následně bylo měření zopakováno s použitím termovizní metody. Před každým měřením byl povrch ohříván horkovzdušnou pistolí na přibližně 45°C tak, aby teplota zobrazované oblasti byla co nejvíce uniformní. Pro zvětšení zorného pole byl před testem odstraněn stropní panel měřicí sekce, přesto se nepodařilo zachytit boční okraje desky.



Obrázek 4.9: Okolí náběžné hrany s použitím termovize

na výsledných snímcích, viz Obr. 4.9, je za NH viditelné místo s nejvyšší teplotou a tedy nejmenším chlazením a rychlostí. V zadní části této oblasti se při předchozím experimentu kumuloval olej. Tato oblast je na obrázku 4.9a označena jako I. Následuje oblast s recirkulací a klesající teplotou, z té byly kapky oleje nesený proti proudu, viz II. Na obrázku 4.9a. Na konci separační bubliny dochází k přilnutí TMV a tedy k výraznému chlazení povrchu, viz III. V oblasti byl v předchozím experimentu olej odnášen po proudu, směrem od náběžné hrany. Na prvních dvou snímcích, Obr. 4.9a a Obr. 4.9b, je v důsledku působení koncových vírů viditelný obloukový tvar separační bubliny. Toto už je méně zřetelné u Obr. 4.9c a Obr. 4.9d. Teplotní rozdíl mezi oblastí za NH a oblastí s TMV dosahoval hodnot okolo 5°C . Nejasné zůstává, proč oblast za přilnutou TMV není chlazená v celém rozsahu, ale s narůstající vzdáleností x je přítomen nárůst teploty, viz IV.

Přes možnou přítomnost TMV za separační bublinou byly po konzultaci s vedoucím práce na povrch modelu instalovány turbulátory. Při experimentu pak bude sledován efekt na mezní vrstvu v jejich uplavu. Turbulátory byly tvořeny pruhem papírové pásky o rozměrech 3x40 mm, na který byly naneseny drobné kapky sekundového lepidla. Přibližné rozměry kapky jsou znázorněny na schématu, viz Obr. 4.10. Vzhledem ke způsobu výroby se rozměry jednotlivých kapek mírně lišily.

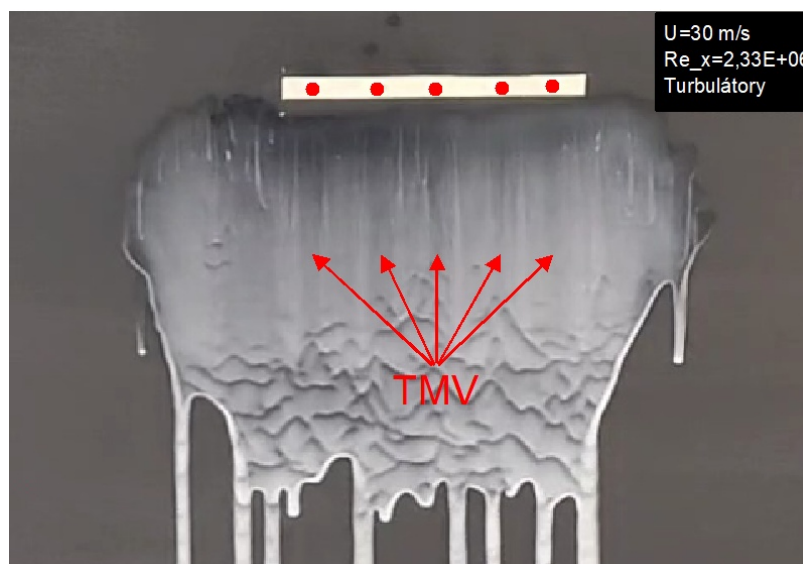


Obrázek 4.10: Rozměry kapky

Turbulátory byly umístěny ve vzdálenosti $x = 1,20 \text{ m}$ na podélné ose desky. Rychlost proudu a odpovídající Reynoldsova čísla byla:

$$U = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad Re_x = 2,33 \cdot 10^6.$$

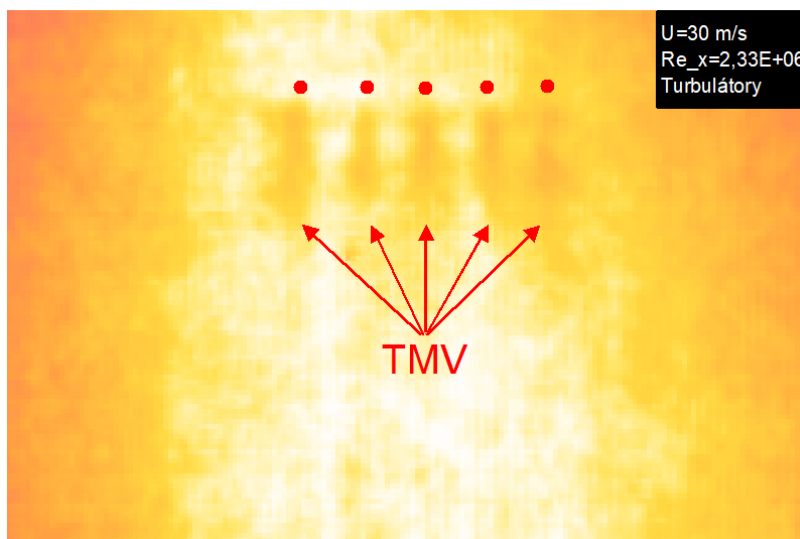
Výsledky vizualizace zobrazuje Obr. 4.11. V místech za turbulátory, které jsou pro názornost zvýrazněny červenými body, je patrné mírné rozrušení proudu. S ohledem na separační bublinu se ale nejedná o přechod LMV na TMV.



Obrázek 4.11: Plochá deska turbulátory – olejový film

Před provedením další části experimentu byl povrch modelu zahříván horkovzdušnou pistolí na teplotu přibližně $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Po pořízení snímku, viz Obr.4.12, byl rozdíl teplot mezi

oblastí s turbulizovaným proudem a okolím stanoven na $0,5 - 1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Nicméně tuto hodnotu lze vzhledem k chybě měření brát pouze jako orientační. Podobně jako u předchozího měření z tohoto nelze vyvodit přechod LMV na TMV.



Obrázek 4.12: Plochá deska turbulátory – termovize

4.3.1 Plochá deska – závěr

po provedení měření na základě testovacího plánu, viz Tab. 4.2, nebyl ve sledované oblasti ($x = 1,1 - 1,3 \text{ m}$) pozorován přechod LMV na TMV, tedy ani kumulace olejové vrstvy, ani snížení teploty povrchu. Toto vedlo k rozšíření oblasti zájmu na celou délku desky. Po provedení testů s podélně nanesenou stužkou oleje při rychlostech z tabulky 4.2, byla viditelná kumulace pouze v oblasti NH.

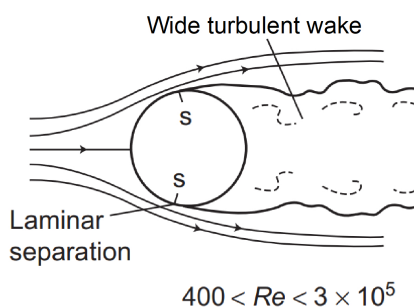
To vedlo k rozhodnutí prověřit danou oblast oběma metodami při rychlostech vypsanych v tabulce 4.3. Na NH byla objevena separační bublina, která byla zobrazena za použití obou metod. Během obtékání separační bubliny se LMV mění na TMV a následně se připojuje k povrchu, což se projevuje výrazným ochlazením na termovizních snímcích. Při vizualizaci s použitím olejového filmu byla objevena recirkulace, která potvrzuje přítomnost separační bubliny a tedy i přechodu z LMV na TMV. Olej se následně hromadil v oblasti s nulovou rychlostí.

Následně byly na povrch instalovány turbulátory, za kterými je na výsledných snímcích viditelná turbulizace proudu. O přechod LMV na TMV se však nejedná z důvodu přítomnosti separační bubliny a již turbulentní mezní vrstvy.

I přes jiný než na začátku očekávaný výsledek, lze experiment z důvodu vizualizace separační bubliny považovat za úspěšný.

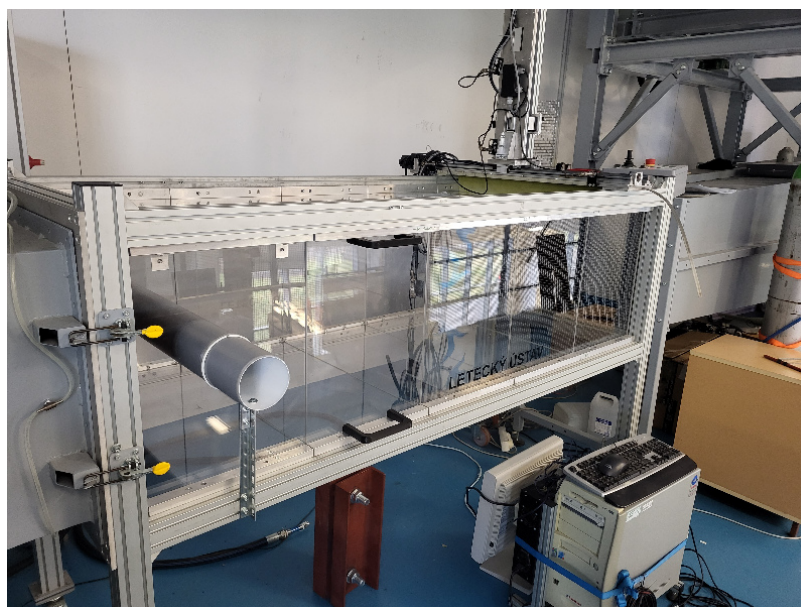
4.4 Válec

Dalším použitým modelem byla válcová trubka. Záměrem bylo vytvořit na modelu přechod LMV na TMV, ale při dosažitelných rychlostech je třeba trubka o příliš velkém průměru. Tím by byl zastíněn moc velký průřez měřicí sekce a docházelo by k výraznému urychlení ve zúžených částech, což by bylo nežádoucí. Průměr byl tedy stanoven na $\phi D = 110 \text{ mm}$, což poskytuje dostatečný rozsah Reynoldsových čísel pro test laminární separace. Současně tento jev bývá u některých zpětných zrcátek příčinou generování vysokofrekvenčního hluku. Schématické znázornění laminární separace je spolu s rozsahem odpovídajících Reynoldsových čísel reprezentováno obrázkem 4.13. po provedení testu na holém válci bude test opakován s připevněnými turbulátory pro vytvoření nuceného přechodu LMV na TMV.



Obrázek 4.13: Schéma obtékání válce s odtržením

Model byl uchycen horizontálně, procházel bočními stěnami měřicí sekce, a jeho osa byla kolmá na nabíhající proud. Jako u předchozího experimentu je během experimentu přítomný tlakový gradient způsobený netěsností v podobě pozorovacího otvoru. Uchycení je znázorněno obrázkem 4.14.



Obrázek 4.14: Uchycení válcové trubky v měřicí sekci

Pro test byla zvolena rychlost:

$$U = 30 \frac{m}{s}.$$

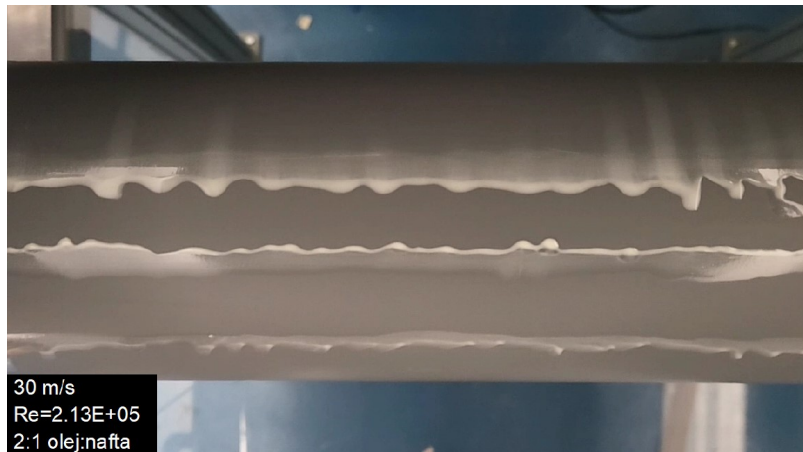
po dosazení do upravené rovnice 2.4:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu}, \quad (4.1)$$

kde ν odpovídá teplotě 24 °C vede k Reynoldsovu číslu:

$$Re = 2,13 \cdot 10^5.$$

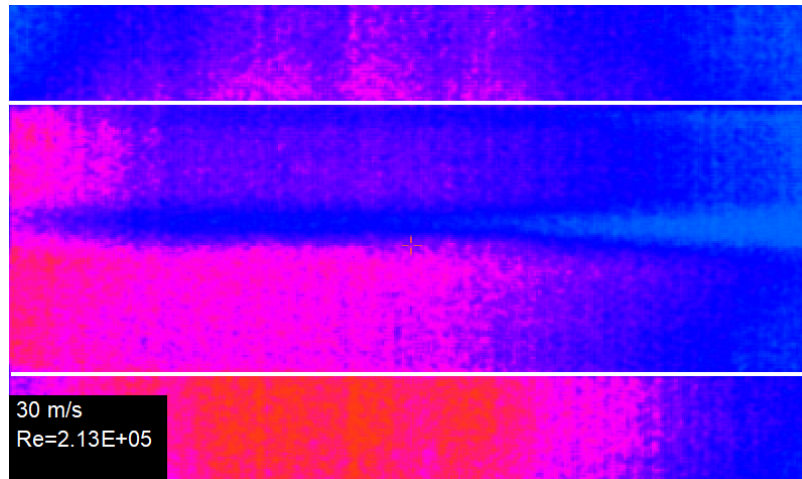
Olej byl na model nanesen ve třech tenkých liniích pro možnost sledování více oblastí. Výsledný snímek, viz Obr. 4.15, ukazuje přeskupení oleje do dvou linií, což neodpovídá předpokládanému výsledku. Třetí linka, na obrázku ve spodní části, nevykazovala velké změny. Což vedlo k závěru, že v horní části dochází ve 36 % tětivy k odtržení, proud se poté opět připojil k povrchu v 59 %.



Obrázek 4.15: Olejový film na válcové trubce – separační bublina

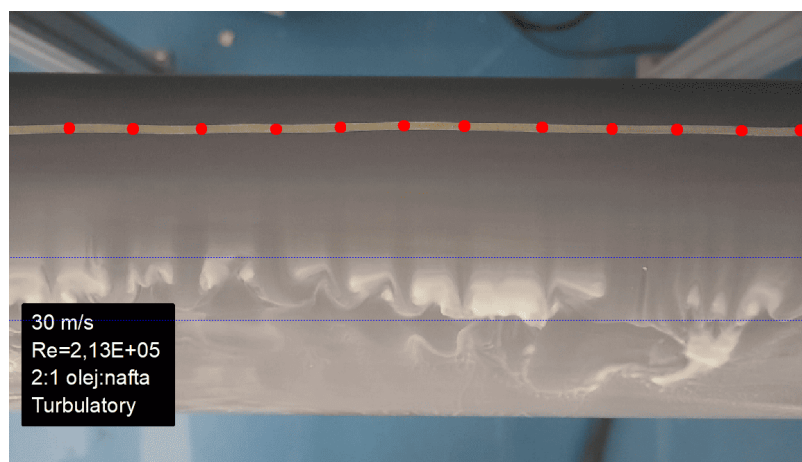
na stejném modelu byl následně proveden test pomocí termovizní metody. Chlazení bylo prováděno za použití nádob s ledem umístěných uvnitř modelu. Boční otvory modelu byly utěsněny pro snížení ohřevu okolním vzduchem. Teplota povrchu naměřená před zahájením testu byla 18° C. Obrázek 4.16 zobrazuje výsledek testu.

ve střední části válce je viditelná chladnější oblast svědčící o nepřítomnosti kontaktu stěny s okolním proudem. Zde se začátek separace jeví být ve 33% tětivy a bod přilnutí v 52 %. Po přilnutí následuje ohřev povrchu související s TMV. Je třeba zmínit, že teplota po stranách snímku vykazuje značné odchylky, což snižuje prokazatelnost výsledku.



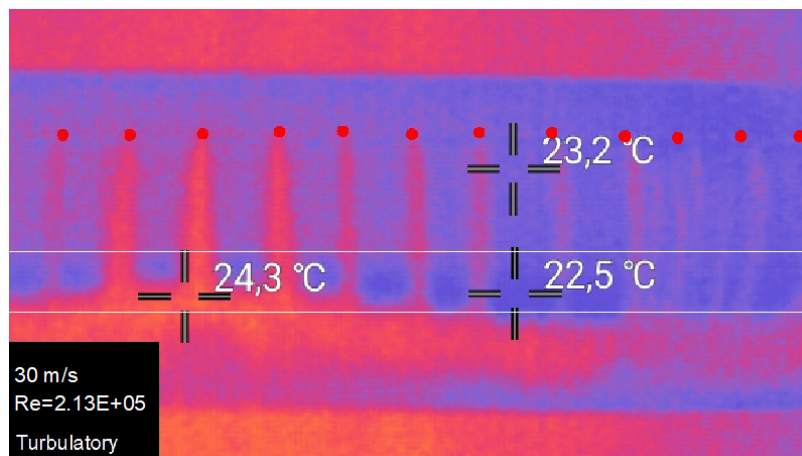
Obrázek 4.16: Termovizní metoda – zobrazení separační bubliny na vlnkové trubce s výrazným rušením

Při následujícím testu byly na povrch do vzdálenosti 15 % těživy umístěny turbulátory. Snímky z testu provedeného s použitím olejového filmu jsou zobrazeny na Obr. 4.17. Oblasti s TMV za červenými body znázorňujícími turbulátory jsou spojeny s nižší koncentrací olejové směsi. Napříč modelem je také pozorovatelná kumulace oleje v oblastech mezi turbulentními stezkami. Přibližné hranice jsou v Obr. 4.17 značeny modrou přerušovanou čarou. Mohlo by jít o separační bublinu rozrušenou stezkami TMV.



Obrázek 4.17: Olejový film na vlnkové trubce s turbulátory

Výsledný snímek znázorňuje Obr.4.18. V oblastech za turbulátory je patrný vyšší ohřev stěny modelu, což nasvědčuje přítomnosti TMV. Podobně jako u předchozí metody, viz Obr. 4.17, jsou rozpoznatelné oblasti s nižší teplotou oddělené stezkami TMV. ve stejných oblastech se na předchozím experimentu usazoval olej, zde jsou tato místa odstíněna od okolního proudu. Na zadní straně válce je patrná oblast o vyšší teplotě, kde pravděpodobně dochází k přilnutí TMV za chladně zobrazenými separačními bublinami. Po testu byl snímek doplněn o bodová měření teploty, která ukázala rozdíl teplot mezi stěnou s TMV a stěnou s LMV v rozmezí 1 – 2 °C.



Obrázek 4.18: Válcová trubka s turbulátory

4.4.1 Válec – vyhodnocení

Během experimentu na holém válci bylo cílem vytvořit separaci LMV. Výsledek testu se liší od teoretického předpokladu. Nicméně v použité literatuře [12] je uvedena poznámka, že zmíněné hodnoty jsou pouze orientační. Odklonění od předpokladu tak mohlo být způsobeno vyšší hodnotou turbulence nebo přítomností tlakového gradientu.

Výsledky měření s použitím olejového filmu svědčí o přítomnosti separační bubliny. První linie byla tlačena po proudu, zatímco druhá byla vynášena proti proudu. Což je spojeno s nárůstem tření v místě přilnutí TMV. Termovizní snímek zobrazuje chladnou oblast v přední části válce, následuje pokles teploty spojený se separací a následně turbulentní znovu připojení mezní vrstvy. Tento průběh odpovídá průběhu teplot při vzniku separační bubliny, ale s ohledem na významné odchylky po stranách snímku bylo snímání zřejmě ovlivněno přehřátím termovizní kamery nebo jinou chybou. Poté byl proveden test s připravenými turbulátory, za nimiž je na snímcích patrné rozrušení proudu. U termovizní metody je za turbulátory viditelné ovlivnění v podobě zvýšení teploty povrchu, což značí přechod LMV na TMV. Snímky z obou metod vykazují vysokou shodu. V místech, která byla pokryta nashromážděným olejem, je u termovizních snímků zřejmý pokles teploty.

4.5 Zpětné zrcátko

Posledním modelem bylo zpětné zrcátko z osobního automobilu, které bylo pro usnadnění polohování uchyceno na stativu umožňujícím rotaci modelu kolem tří os. Model na stativu je vyobrazen na Obr.4.19. Tento způsob uchycení vyžadoval odstranění jednoho ze segmentů spodní stěny měřicí sekce.

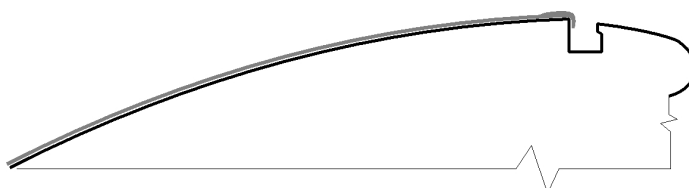
Pro kalibraci metody byly na model nejdříve umístěny turbulátory a následně byl proveden test při rychlosti, při které docházelo podle interní komunikace se Škoda Auto ke vzniku vysokofrekvenčního hluku a potenciálnímu odtržení LMV. Rychlost měření a odpovídající Reynoldsovo číslo jsou:

$$U = 40 \frac{m}{s}, Re = 1,05 \cdot 10^7.$$



Obrázek 4.19: Uchycení zpetného zrcátka

Výsledek měření, viz Obr. 4.21, ukazuje podobně jako válcové trubky menší koncentraci oleje v oblastech za turbulátory, což odpovídá zvýšení smykového tření. V levé části je však rozrušení nepravidelné, což je zapříčiněno stečením oleje na turbulátory a jejich znečištěním. Koncentrace oleje lze také sledovat v zadní části zrcátka na hraně horního povrchu, což je spíše příčinou geometrie modelu, viz Obr. 4.20, než změnou v obtékání. Na obrázku je znázorněno stékání oleje po svislém ploše vybrání a olejová vrstva je reprezentována šedou barvou.

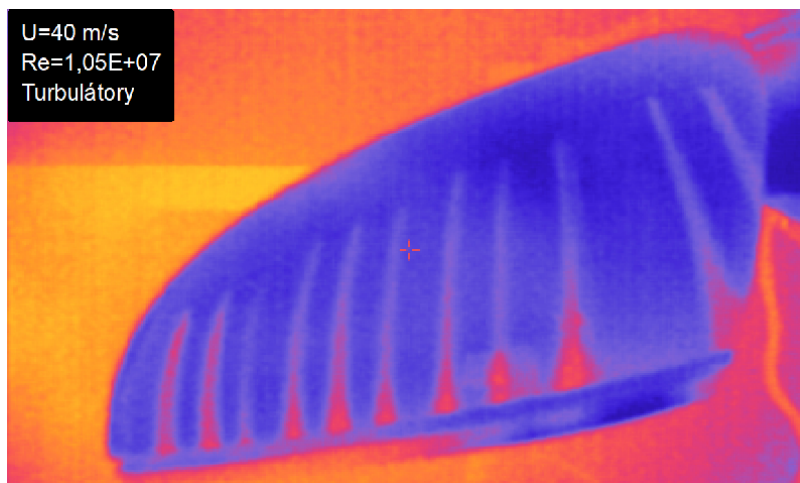


Obrázek 4.20: Schématický řez zrcátka



Obrázek 4.21: Zpětné zrcátko s turbulátory – oilflow

Před provedením testu s použitím termovize byl model ochlazen v chladicím boxu. Snímek pořízený při měření je znázorněn Obr.4.22. Opět jsou za turbulátory patrné stezky přechodu TMV s rozdílem teplot mezi regiony dosahujícím $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ohřev povrchu je také pozorovatelný na černém lemu v zadní části modelu, což svědčí o přítomnosti TMV.



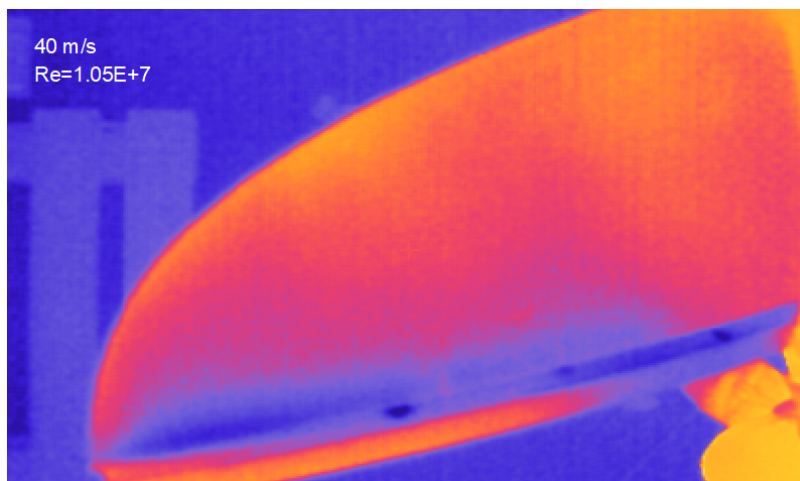
Obrázek 4.22: Zpětné zrcátko s turbulátory – termovizní metoda

Dalším krokem bylo odstranění turbulátorů a opakované provedení zkoušky. Obrázek 4.23 znázorňuje výsledek testu. Ze snímku je patrná kumulace oleje v levé zadní části krytu zpětného zrcátka, ta svědčí buď o laminární separaci proudu nebo přechodu LMV na TMV.



Obrázek 4.23: Zpětné zrcátko – olejový film

Před následujícím testem byl model opět ochlazován v chladicím boxu a to do té míry, že na Obr. 4.24 jsou stále patrné částice námrazy, které po čištění povrchu ulpěly ve vybrání. V levé zadní části je pozorovatelná chladná oblast, která indikuje separaci LMV. Na černém lemu je patrné vyšší ohřev, což značí přítomnost TMV.



Obrázek 4.24: Zpětné zrcátko separace proudění

4.5.1 Zpětné zrcátko – závěr

Během testů bylo provedeno měření zpětného zrcátka, na kterém byl s použitím turbulátorů vytvořen přechod LMV na TMV. Přechod byl úspěšně vizualizován oběma metodami. Termovizní metoda současně ukázala přítomnost ohřevu v levé oblasti lemu na odtokové hraně, což ukazuje přítomnost TMV. Metoda olejového filmu toto ukázat nemohla z důvodu členitosti geometrie zrcátka.

Při opakování testů na holém zrcátku bylo možno identifikovat oblast ohraničenou poměrně stabilní hranicí oleje. Toto vypovídá o přítomnosti přechodu LMV na TMV nebo laminární separaci. Termovizní snímek ukazuje v tomto místě nižší teploty, což vypovídá o laminární separaci a následném přilnutí k povrchu lemu na odtokové hraně, kde jsou patrné vyšší teploty. Laminární separace je způsobena nárůstem tlaku v blízkosti odtokové hrany.

Ohřev na odtokové hraně zpětného zrcátkaa byl při prvních experimentech považován za chybu měření spojenou s rozdílnou emisivitou povrchu. Po opakovaném měření a uvedení do kontextu s výsledky metody olejového filmu, se chyba způsobená emisivitou zdá být nepravděpodobná.

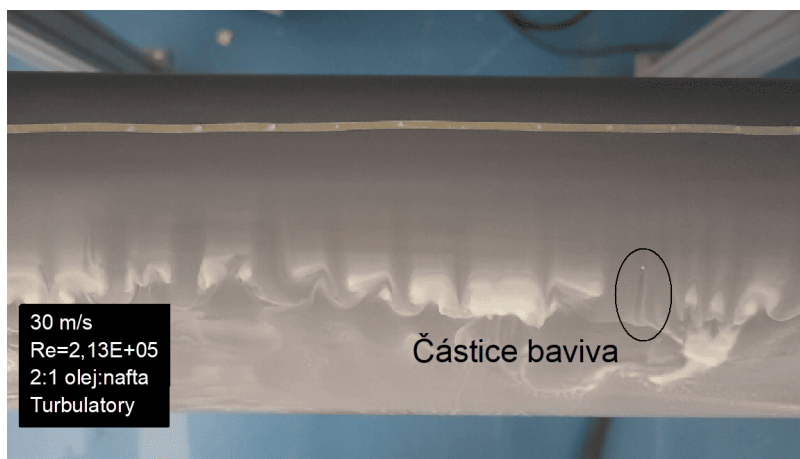
4.6 Chyby měření

Během průběhu testů bylo zjištěno několik chyb, které mohou nastat při použití jedné či druhé z vybraných metod. Tyto chyby mohou být spojeny s principem fungování každé z metod a s ním spojenými nedostatky nebo se způsobem uchycení, které mohlo způsobit netěsnost v měřicí sekci.

Chyby spojené s metodou **olejového filmu** mohly být:

- ovlivnění tečení oleje nečistotami na povrchu modelu,
- špatná smáčivost povrchu,
- stékání před spuštěním testu,
- usazování nerozmíchaných částic barviva.

Poslední ze zmíněných lze sledovat na některých z pořízených snímků, např. při testu s válcovou trubkou, viz Obr. 4.25. Usazená částice viditelně ovlivňuje proudění svým uplavením. Ovlivnění je však pouze lokální, tedy nedochází k znehodnocení výsledku experimentu jako celku. V experimentech, při kterých byla použita olejová směs s bílou příměsí, byl v některých případech pozorován nízký kontrast s okolním povrchem. Toto není závažný problém a mohl být vyřešen přidáním většího množství titanové běloby.

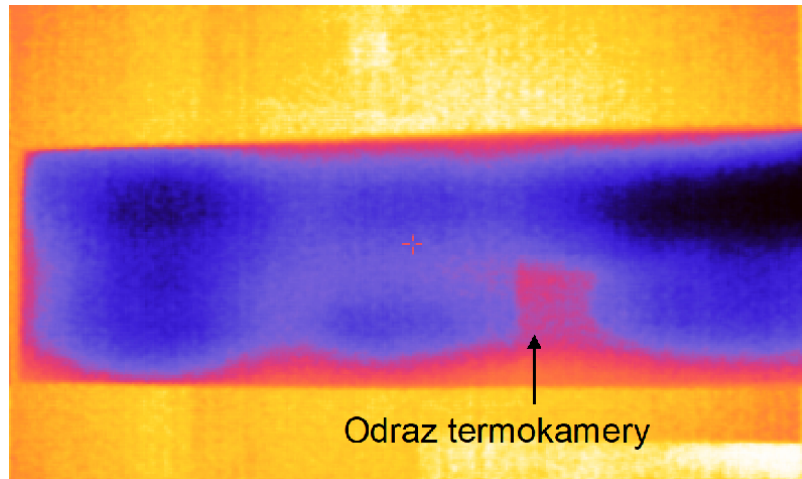


Obrázek 4.25: Usazení částice barviva

Termovizní metoda je zatížena jinými druhy chyb, mezi které patří zejména:

- odrazy okolních předmětů,
- rozdílnost emisivity různých povrchů modelu,
- zahřívání termovizní kamery,
- tvorba námrazy na ochlazovaném povrchu
- nebo rozdílnost tloušťky stěny modelu.

Obr. 4.26 ilustruje případ odrazu zahřáté termovizní kamery na povrchu modelu. Během testů bylo tomuto problému předcházeno zkrácením intervalu spuštění termovizní kamery, čímž se částečně zamezilo jejímu ohřevu. Kromě nežádoucích odrazů je přehřátí kamery také spojeno s rozkalibrováním přístroje, který pak ukazuje chybné teploty.



Obrázek 4.26: Tepelný odraz na povrchu modelu

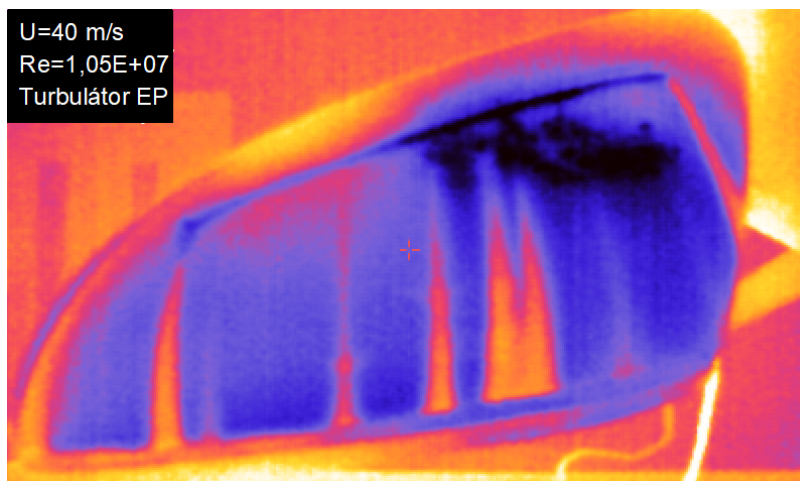
Potenciálním problémem by mohla být také rozdílná emisivita různých povrchů modelu. Tento faktor totiž významně ovlivňuje zobrazovanou teplotu. Je překvapivé, že i přes vysoký rozdíl v odhadované emisivitě povrchů zpětného zrcátka, u černého okolo 0,9 a u bílého asi 0,5, nebyly mezi těmito dvěma oblastmi sledovány žádné významné teplotní skoky.

4.7 Návrh způsobu chlazení či ohřevu

Vzhledem k tomu, že hledaná metoda by měla být uplatnitelná v automobilovém průmyslu, kde jsou testy prováděny na kompletních automobilech, bylo by velmi obtížné používat způsob chlazení použitý při experimentu v podkapitole 4.5. Tedy není možné testované těleso pro jeho rozměry ochlazovat v chladícím boxu. Možnosti spojené s vytvořením teplotního gradientu jsou dvě: teplotu tělesa lze buď snížit, nebo zvýšit. Pro každou z metod existuje mnoho způsobů jak dosáhnout cíle, ale zde je třeba najít takový, který by byl co nejrychlejší a nejefektivnější. Nicméně i při čase ohřevu, resp. chlazení, je metoda stále spojená s udržením čistoty modelu a měřicí sekce, což je na rozdíl od metody využívající olej výhoda. Další výhodou je zachycení celého teplotního reliéfu testovaného modelu, což u oleje může být problematické s ohledem na skokové změny ve tvaru modelu.

4.7.1 Chlazení modelu

Jako první z možností bude popsáno chlazení modelu. To je třeba provádět tak, aby výsledná teplota povrchu byla co nejvíce rovnoměrná. Během experimentování v rámci této diplomové práce bylo testováno chlazení za použití komerčně dostupného mrazícího spreje určeného k vyhledávání studených spojů v elektronických součástkách. Tímto způsobem lze povrch ochladit v rámci jedné či dvou minut. Problematické však je dodržet rovnoměrnost ochlazení povrchu. Při nanášení spreje je proto výhodné používat pro získání přehledu termovizní kameru. Nanášení chladiva na větší plochy je také spojeno s vysokou spotřebou spreje, který není určen pro použití v tomto rozsahu. Pro snížení spotřeby přichází v úvahu aplikace spreje pouze na oblast v blízkosti odtokové hrany, kde je přítomen nárůst tlaku a možnost separace proudu.



Obrázek 4.27: Povrch zrcátka chlazený s použitím mrazícího spreje

Jeden z testů, při kterém byl k chlazení povrchu použit mrazicí sprej, je znázorněn na obrázku 4.27. Během tohoto měření byl na povrch nainstalován turbulátor tvořený třemi vrstvami elektrikářské pásky, takže tento případ nelze porovnat s ostatními testy. Je viditelné, že povrch je ochlazený nerovnoměrně. Přesto je na něm možno identifikovat klínovité oblasti s TMV. Ty vznikaly v důsledku přítomnosti drobných výstupků a hran.

4.7.2 Ohřev modelu

Stejně jako u chlazení i zde je podstatná rovnoměrnost prohřátí sledovaného povrchu. Pro experiment s plochou deskou (4.3), byl tento způsob změny teploty upřednostněn před chlazením. Hlavními důvody pro toto rozhodnutí byly velké rozměry modelu, ze kterých plyne nemožnost umístění do chladícího boxu a případná vysoká spotřeba mrazícího spreje. K ohřevu povrchu byla zvolena horkovzdušná pistole s nastavitelnou teplotou vyfukování. Podobně jako u chlazení byl průběh změny teploty sledován s pomocí termovizní kamery. Celý průběh trval mezi 3 až 5 minutami, což se oproti aplikaci spreje jeví jako dlouhý čas, ale ohřívaná plocha byla minimálně čtyřnásobně větší než u zpětného zrcátka. Současně nedochází ke vzniku námrazy, která musí být odstraňována po použití chladícího spreje. K zefektivnění procesu by mohlo přispět také výkonnější topné zařízení.

Kapitola 5

Závěry

Tato diplomová práce se věnovala návrhu a ověření funkčnosti vizualizační metody, která je schopná rozpoznat přechod laminární mezní vrstvy (LMV) na turbulentní mezní vrstvu (TMV). Práce byla rozdělena celkem do 4 kapitol.

V první kapitole byla vysvětlena motivace stojící za hledáním vizualizační metody. Byl stručně objasněn problém vzniku vysokofrekvenčního hluku na horní straně zpětných zrcátek automobilu a proč bylo důležité tento problém řešit. V kontextu současně používaných metod bylo poukázáno na jejich nedostatky a z čeho plynulo hledání nové praktičtější vizualizační metody pro rozpoznávání přechodu LMV na TMV.

V druhé kapitole byla věnována pozornost teorii potřebné pro uchopení problematiky mezní vrstvy a jejího vzniku v závislosti na existenci viskozity. Byl popsán laminární a turbulentní režim mezní vrstvy a za jakých okolností dochází k přechodu z jednoho na druhý. Byly popsány vlivy zabraňující a přispívající k rychlému vzniku přechodu LMV na TMV. S ohledem na jev vznikající na horním krytu zpětných zrcátek byly přiblíženy podmínky nutné pro vznik separace laminární a turbulentní mezní vrstvy.

Třetí kapitola cílila na vizualizační metody s možností zobrazování proudění na povrchu těles. Na základě zjištěných informací byly mezi sebou jednotlivé metody porovnány a byla vybrána ta, která nejlépe vyhovovala zvoleným požadavkům. Pro prokázání funkčnosti během experimentálních zkoušek byla zvolena metoda zobrazování za použití termovizní kamery. Jako potvrzovací byla vybrána metoda využívající k vizualizaci olejového filmu (oilflow).

Ve čtvrté kapitole byly na základě teoretické části navrženy dva modely, na kterých byly provedeny testy mající za cíl ověření spolehlivého fungování termovizní metody pro vizualizaci přechodu LMV na TMV. Před sledováním termovizní metodou byl povrch ploché desky pro vytvoření teplotního gradientu ohříván s použitím horkovzdušné pistole. Válcová trubka byla chlazená bloky ledu, umístěnými uvnitř dutiny trubky. U obou zvolených modelů, ploché desky i válcové trubky, byly při testech sledovány jiné než teoreticky předpokládané výsledky. Tyto jevy však byly vždy zobrazeny metodou oilflow a termovizní metodou s vysokou mírou shody. Jedinou výjimku tvořil případ, při kterém termovizní kamera při zobrazování produkovala vysoké množství šumu. Což bylo dáno za vinu přehřátí přístroje. Během experimentů byla na náběžné hraně ploché desky rozpoznána separační bublina, za kterou docházelo k přilnutí TMV. Na povrchu válcové trubky byl zobrazen

nucený přechod LMV na TMV. Zpětné zrcátko bylo před testem s použitím termovizní metody chlazeno v mrazicím boxu. Při testu zpětného zrcátka byl nejdříve s použitím obou metod zobrazen nucený přechod LMV na TMV. Následně byla na holém zrcátku odhalena separace proudu v levé zadní části.

Výsledky experimentů svědčí o spolehlivosti termovizní metody. Jediná výjimka, kdy metoda selhala, byla způsobena přehřátím techniky. Po ochlazení metoda opět fungovala spolehlivě a získané výsledky byly srovnatelné s výsledky získanými metodou oilflow. Proto byla termovizní metoda posouzena jako vhodná pro použití při testování v automobilovém průmyslu.

Následně byly v práci popsány chyby spojené s použitými metodami. Co se týče termovizní metody byl nejzávažnější chybou tepelný odraz okolních předmětů. Během provedených experimentů byly provedeny kroky pro zamezení této chyby. Jednalo se o zkrácení intervalu měření, čímž bylo zabráněno přehřívání termovizní kamery. U metody oilflow pak šlo hlavně o stékání, které lze vyřešit šetrnějším nanášením nebo rychlejším spuštěním tunelu. Další možnou chybou bylo usazování částic pigmentu, které lze vyřešit důkladnějším promícháním nanášené směsi.

Na konci čtvrté části byly popsány návrhy způsobů ohřevu či chlazení zpětných zrcátek na kompletním automobilu ve větrném tunelu. Oba uvedené způsoby jsou teoreticky použitelné a vhodné k provedení zkušebních testů.

Literatura

- [1] *The engineering toolbox*. 2001. Dostupné z: <https://www.engineeringtoolbox.com/>.
- [2] *Te – SQ1*. I3 Systems Inc., 2016. Dostupné z: <http://www.i3-thermalexpert.com/products/te-sq1/>.
- [3] *Flow visualization*. Jul 2019. Dostupné z: <https://www.aa.washington.edu/AERL/KWT/techguide/flowviz>.
- [4] BARLOW, J., RAE, W. a POPE, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. 3. vyd. JOHN WILEY ‘I&’ SONS, INC., 1999. ISBN 9780471557746.
- [5] BORGMANN, D., HOSSEINVERDI, S., LITTLE, J. a FASEL, H. Investigation of Laminar Separation Bubbles Using Experiments, Theory and DNS. In: Srpen 2021, s. 16. DOI: 10.2514/6.2021-2898.
- [6] BRANDON, J. M., MANUEL, G. S., WRIGHT, R. E. a HOLMES, B. J. In-flight flow visualization using infrared imaging. *Journal of Aircraft*. 1990, sv. 27, č. 7, s. 612–618. DOI: 10.2514/3.25330.
- [7] EIFFEL, G. Sur la résistance des sphères dans l’air en mouvement. *Comptes Rendus*. 1912, sv. 155, s. 1597–1599.
- [8] F., F. D. a MEYER ROBERT R., J. *Flow Visualization Techniques for Flight Research*. 1. vyd. Ames Research Center, Dryden Flight Facility, Edwards, California: NASA Ames Research Center Moffett Field, CA, United States, 1988.
- [9] GAZLEY, C. Boundary-Layer Stability and Transition in Subsonic and Supersonic Flow. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1953, sv. 20, č. 1, s. 19–28. DOI: 10.2514/8.2519.
- [10] GIPSON, L. a PRESTON, M. *Glow with the flow*. NASA Langley, Sep 2013. Dostupné z: https://www.nasa.gov/aero/flow_patterns_image.html.
- [11] HELFER, M. 1 Localization of Sound Sources. In: říjen 2000, s. 15. ISBN 3-8169-1843-3.
- [12] HOUGHTON, E., COLLICOTT, S., CARPENTER, P. a VALENTINE, D. *Aerodynamics for Engineering Students*. 6. vyd. Elsevier Science, 2012. Aerodynamics for Engineering Students. ISBN 978-0-08-096632-8.
- [13] JELÍNEK, TOMÁŠ. Experimental Investigation of the Boundary Layer Transition on a Laminar Airfoil Using Infrared Thermography. *EPJ Web Conf*. 2018, sv. 180. DOI: 10.1051/epjconf/201818002040.

- [14] JR., R. R. M. a JENNETT, L. A. *In-Flight Surface Oil-Flow Photographs With Comparisons to Pressure Distribution and Boundary-Layer Data*. NASA, duben 1985.
- [15] KADLEC, K. Teoretické základy bezdotykového měření (1. část). *Časopis Automa*. 2014, sv. 20, č. 2, s. 13–15. Dostupné z: <https://www.example.com/article>.
- [16] KUMBÁR, V., SKŘIVÁNEK, A. et al. Temperature dependence viscosity and density of different biodiesel blends. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2015, sv. 63, č. 4, s. 1147–1151.
- [17] LAJZA, O. *Optimalizace chladicího systému letounů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 81 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
- [18] LOUNSBERRY, T., GLEASON, M. a PUSKARZ, M. Laminar Flow Whistle on a Vehicle Side Mirror. In: Duben 2007. DOI: 10.4271/2007-01-1549.
- [19] MANUEL, G. S., DARYABEIGI, K., ALDERFER, D. W. a OBARA, C. J. In-Flight Off-Surface Flow Visualization Using Infrared Imaging. *SAE Transactions*. SAE International. 1991, sv. 100, s. 131–139. ISSN 0096736X, 25771531.
- [20] MERZKIRCH, W. *Techniques of flow visualization*. ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT NEUILLY-SUR-SEINE (FRANCE), 1987.
- [21] OBARA, C. J. Sublimating chemical technique for boundary-layer flow visualization in flight testing. *Journal of Aircraft*. 1988, sv. 25, č. 6, s. 493–498. DOI: 10.2514/3.45611.
- [22] PRANDTL, L. Bemerkungen über die Entstehung der Turbulenz. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*. 1921, sv. 1, s. 431–436.
- [23] PRANDTL, L. Über Flüssigkeitsbewegungen bei sehr kleiner Reibung. *Verhandlungen des III. Internationale Mathematiker-Kongresses in Heidelberg*. 1904, s. 484–491.
- [24] PRANDTL, L. Der Luftwiderstand von Kugeln. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1914, s. 177–190.
- [25] REDA, D. C. a MURATORE, J. J. Measurement of surface shear stress vectors using liquid crystal coatings. *AIAA Journal*. 1994, sv. 32, č. 8, s. 1576–1582. DOI: 10.2514/3.12146.
- [26] REYNOLDS, O. XXIX. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1883, sv. 174, s. 935–982. DOI: 10.1098/rstl.1883.0029.
- [27] SCHLICHTING, H. Zur Entstehung der Turbulenz bei der Plattenströmung. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*. 1933, sv. 13, s. 171–174.
- [28] SCHLICHTING, H. a GERSTEN, K. Extensions to the Prandtl boundary-layer theory. In: *Boundary-Layer Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

- [29] SCHUBAUER, G., SKRAMSTAD, H., AERONAUTICS, U. S. N. A. C. for a STANDARDS, U. S. N. B. of. *Laminar-boundary-layer Oscillations and Transition on a Flat Plate*. U.S. Government Printing Office, 1948. Report (United States. National Advisory Committee for Aeronautics).
- [30] SETTLES, G. S. a TENG, H.-Y. Flow visualization methods for separated three-dimensional shock wave/turbulent boundary-layer interactions. *AIAA Journal*. 1983, sv. 21, č. 3, s. 390–397. DOI: 10.2514/3.8085.
- [31] SETTLES, G. S. *An experimental study of compressible turbulent boundary layer separation at high Reynolds numbers*. Princeton University, 1976.
- [32] SMITH, J. A., PISETTA, G. a VIOLA, I. M. The scales of the leading-edge separation bubble. *Physics of Fluids*. Duben 2021, sv. 33, č. 4. DOI: 10.1063/5.0045204. ISSN 1070-6631. 045101.
- [33] TIETJENS, O. 1929/31.
- [34] TOLLMIEEN, W. Über die Entstehung der Turbulenz. 1. Mitt. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1929, s. 21–44.
- [35] WIESELSBERGER, C. Der Luftwiderstand von Kugeln. *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt (ZFM)*. 1914, sv. 5, s. 140–144.