

ABSTRAKT

ŘURDINA, L. *Metody vizualizace proudění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Lízal.

Práce pojednává o metodách vizualizácie prúdenia tekutín s ohľadom na možnosti ich praktickej aplikácie. Chronologický opis historicky významných vizualizačných experimentov zdôrazňuje úlohu vizualizácie prúdenia v experimentálnej mechanike tekutín. Stručná charakteristika prúdového poľa obsahuje matematický popis objektov, ktoré môžeme v prúdení zviditeľniť. Vizualizačné metódy sú rozdelené na experimentálne a počítačovo asistované. Jednotlivé metódy sú radené postupne od tých s najnižšími nárokmi na vybavenie po náročnejšie metódy. Postupne sú v práci objasnené rôzne techniky, pomocou ktorých je možné získať kvalitatívne aj kvantitatívne údaje o sledovanom prúdení plynov a kvapalín. Poznatky sú následne zhrnuté do stručného prehľadu pre voľbu metód pre rôzne aplikácie. Na záver je uvedený popis vykonaného jednoduchého experimentu vizualizácie prúdenia pomocou metódy héliových bublín.

Klíčové slová: vizualizace proudění, mechanika tekutin, proudové pole, proudnice, experimentální metody, héliové bublinky, vodíkové bublinky, optické metody, fluorescence, Particle Image Velocimetry

ABSTRACT

ŘURDINA, L. *Flow visualization methods*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2010. 45 p. Thesis supervisor Ing. František Lízal.

This thesis deals with fluid flow visualization methods with respect to their practical application possibilities. Chronological description of the historically valuable visualization experiments emphasises the role of visualization in the experimental fluid mechanics. A brief characteristic of the flow field contains mathematical description of the objects, which can be visualized. Visualization methods are divided into experimental and computer aided methods. Individual methods are ordered subsequently beginning with those with lowest requirements for equipment to the more sophisticated methods. Various techniques, which provide qualitative and quantitative description of the tested gas or liquid flow, are described. The overview for the choice of methods for various applications sums up the important facts from previous chapters. Description of a simple helium bubble flow visualization experiment realized in a lab can be found at the end of the thesis.

Key words: flow visualization, fluid mechanics, flow field, streamline, experimental methods, helium bubbles, hydrogen bubbles, optical methods, fluorescence, Particle Image Velocimetry

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu na tému *Metody vizualizace proudění* vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a dostupných prameňov uvedených v bibliografii na konci tejto práce.

V Brne, dňa 14.5. 2010

.....
Lukáš Ďurdina

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval pánovi Ing. Františkovi Lízalovi za odbornú pomoc pri písaní práce, za poskytnutie cenných informácií, času a v neposlednej rade za pomoc pri realizácii experimentu popísaného v tejto bakalárskej práci.

1 OBSAH

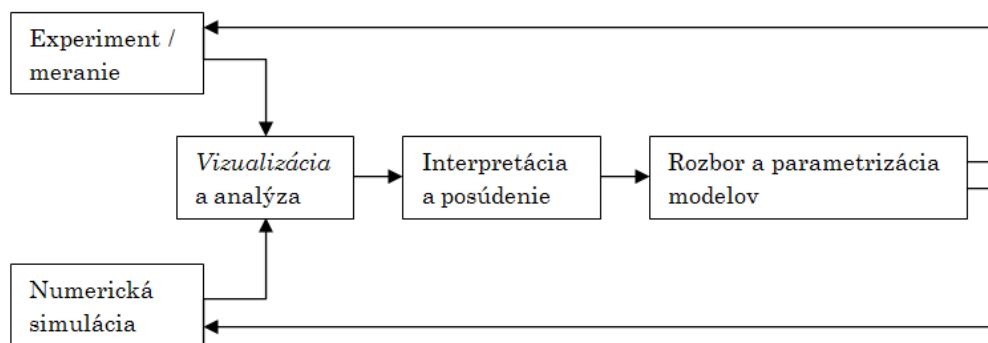
1	Úvod.....	9
2	Historicky významné vizualizačné experimenty	10
3	Interpretácia vizualizácie prúdenia	13
3.1	Charakteristiky prúdového poľa	13
3.2	Kritické body v prúdovom poli	16
4	Rozdelenie metód vizualizácie prúdenia	17
5	Zavádzanie látok a častíc do tekutiny.....	19
5.1	Vizualizácia prúdenia kvapaliny pomocou farbiva	19
5.1.1	Druhy používaných farbív.....	19
5.1.2	Spôsoby vstrekovania farbiva	20
5.2	Vizualizácia prúdenia plynov pomocou dymu.....	21
5.2.1	Generátory dymu a hmly	21
5.2.2	Produkcia dymu pomocou drôtu (Smoke Wire)	22
5.2.3	Zviditeľňovanie v dymovom tuneli	23
5.2.4	Zviditeľňovanie vo voľnom priestore	24
5.3	Vizualizácia prúdenia kvapaliny zavádzaním jednotlivých častíc	24
5.4	Vizualizácia prúdenia vzduchu pomocou héliových bublín	26
5.4.1	Generátor héliových bublín SAI Model 5.....	27
5.5	Osvetlenie skúšobnej trate pri zavádzaní látok do tekutiny	28
6	Zviditeľnenie prúdenia sledovaním upravených povrchov.....	31
7	Vizualizácia prúdenia pomocou nitových sond	33
8	Elektricky riadené metódy	35
8.1	Metóda vodíkových bublín.....	35
8.1.1	Aparatúra na generovanie vodíkových bublín.....	35
8.2	Telúrová metóda	37
8.3	Sledovanie iskrových výbojov	38
9	Optické vizualizačné metódy.....	39
9.1	Tieňová metóda.....	40
9.2	Šlírová metóda.....	41
9.3	Machova – Zehnderova interferometria.....	43
10	Particle Image Velocimetry (PIV)	46

11	Prehľad pre voľbu vizualizačných metód pre rôzne aplikácie	49
12	Experiment	53
12.1	Usporiadanie aparatury	53
12.2	Tvorba záznamu	54
12.3	Zhodnotenie.....	54
13	Záver	55
14	Zoznam použitých symbolov.....	56
15	Bibliografia	57

Zviditeľnenie javov, ktoré vznikajú pri určitom fyzikálnom procese, uľahčuje ich pochopenie a preniknutie do ich podstaty. Práve prúdové pole u pohybujúcej sa tekutiny má častokrát komplikovaný tvar, ktorý nie je viditeľný priamym pozorovaním. Najúčinnjším spôsobom na jeho zviditeľnenie sú *vizualizačné metódy*, ktoré sa uplatňujú v experimentálnej mechanike tekutín a rôznych praktických aplikáciách.

Význam vizualizácie spočíva v možnosti kvalitatívneho a pri niektorých metódach aj kvantitatívneho posúdenia sledovaného javu. Na základe získaných údajov môžeme lepšie poznať súvislosti sledovaných javov a vytvárať výpočtové modely, ktoré môžeme použiť na priame riešenie inžinierskych problémov.

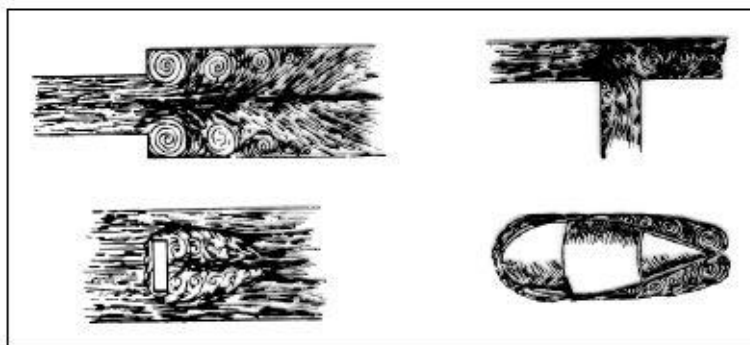
Od 70. rokov 20. storočia konkuruje experimentálnym metódam *výpočtová mechanika tekutín* (CFD), ktorá však nemusí vždy poskytovať informácie úplne odpovedajúce skutočnosti z dôvodu použitia zjednodušených podmienok a algoritmov [1]. V súčasnosti rastie potreba nových a pokročilejších vizualizačných metód, ktoré v spojitosti s výpočtovou technikou dokážu efektívne experimentálne overiť výsledky získané numerickou simuláciou.



Obr. 1.1 Úloha vizualizácie prúdenia v experimentálnej mechanike tekutín

Cieľom mojej práce je poskytnúť základné informácie o rôznych vizualizačných metódach s ohľadom na možnosti ich aplikácie, výhody a nevýhody. Vzhľadom na široký záber danej problematiky som sa zameral len na najpoužívanejšie a najvýznamnejšie metódy.

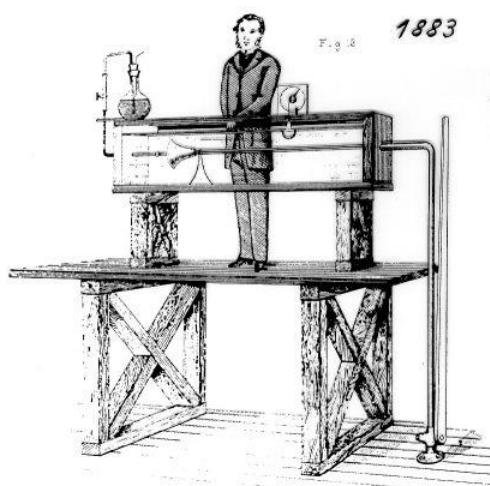
Priekopníkom v oblasti vizualizácie prúdenia bol renesančný vynálezca a umelec *Leonardo da Vinci* (1452-1519). Zaoberal sa obtekaním telies, prúdením v potrubíach (Obr. 2.1), taktiež vo



Obr. 2.1 Vizualizácie prúdenia v kresbách Leonarda da Vinci [20]

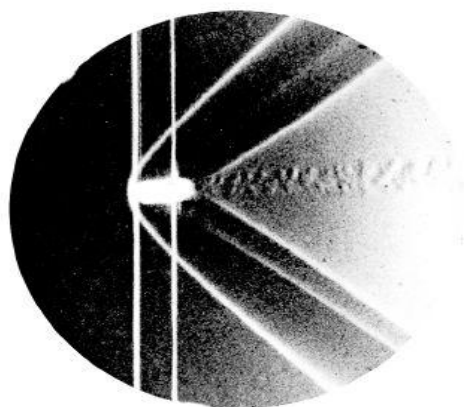
svojich zápiskoch popisuje vplyv vírov v kvapaline na pohyb telies plávajúcich na hladine. Podľa Johna L. Lumleyho z Cornell University je možné, že Leonardo vedel vysvetliť určité javy, ktoré oficiálne objasnili vedci až v 19. a 20. storočí [2].

V roku 1883 *Osborne Reynolds* (1842-1912) realizoval pokusy, pri ktorých skúmal prúdenie vody v trubici, pričom na zviditeľnenie prúdenia kontinuálne vstrekoval do trubice roztok manganistanu draselného (Obr. 2.2). Pri zvyšovaní rýchlosti prúdenia sa v určitom mieste začne vlákno prerušovať [3]. Na základe týchto experimentov popísal podmienky, za akých sa laminárne prúdenie mení v turbulentné.¹



Obr. 2.2 Reynoldsov experiment [20]

Za najväčší prínos v oblasti experimentálnej vizualizácie považuje Merzkirch [4] prácu *Ernsta Macha* (1838-1916), ktorý už vo svojej dobe používal šlírovú metódu, interferometrické metódy a vysokorýchlostné fotografovanie. Pomocou týchto metód dokázal zviditeľniť tlakové vlny od balistickej strely pri prekročení zvukovej bariéry (Obr. 2.3) [5].



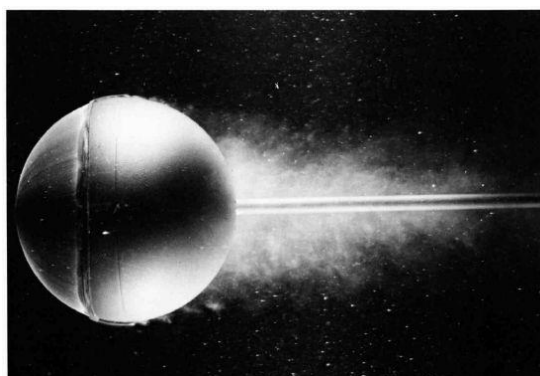
Obr. 2.3 Mosadzný projektíl pri nadzvukovom lete zviditeľnený šlírovou metódou E. Machom v roku 1888 v Prahe [32]

¹ REYNOLDS, O. *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, 1883. Citované podľa [3].*

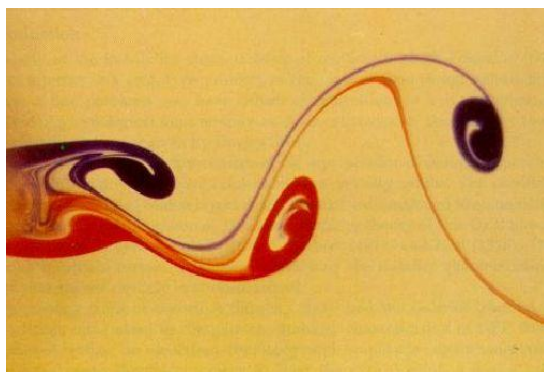
Mach ako fenomenológ pokladal vizualizáciu javov za významný zdroj vedeckých dôkazov.²

Ludwig Prandtl (1875-1953), ktorý je považovaný za zakladateľa modernej mechaniky tekutín [6], realizoval pokus vizualizácie obtekania sférického telesa vodou s bublinkami vzduchu. Zistil, že ak na skúšobné teleso pripevní obruč z tenkého drôtu pred rovníkový rez kolmo na smer prúdenia (Obr. 2.4), stáva sa medzná vrstva turbulentnou, ktorá je stabilnejšia ako laminárna a k jej odtrhnutiu dochádza ďalej za rovníkovým rezom, čím sa dramaticky znižuje odpor oproti neupravenému skúšobnému telesu. Tento poznatok sa v súčasnosti bežne využíva v praxi (turbulátory). Prandtl sa tiež podieľal na vývoji aerodynamických profilov, ktoré nechal obtekať dymom a odvodiť závislosť vztlaku na uhle nábehu [7].

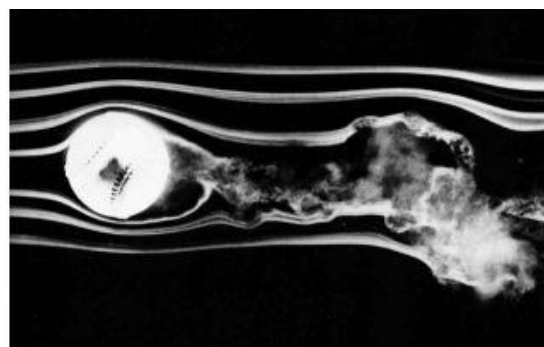
Vizualizácia prúdenia v 2. polovici 20. storočia umožnila potvrdenie hypotéz o jave známom ako „Kármánova vírová cesta“ (angl. Kármán vortex street) na počesť Theodora von Kármána (1881 – 1963), ktorý tento jav ako prvý popísal.³ Hodnota Kármánovej práce spočíva vo využití jeho analýz napríklad na objasnenie havárie mostu Tacoma Narrows v štáte Washington počas silného vetra v roku 1940 [8]. Možnosti vizualizácie tohto javu popisuje Panakin et al. [9].



Obr. 2.4 Prandtlov pokus [32]



Obr. 2.5 Vizualizácia Kármánových vírov za kruhovým valcom [29]

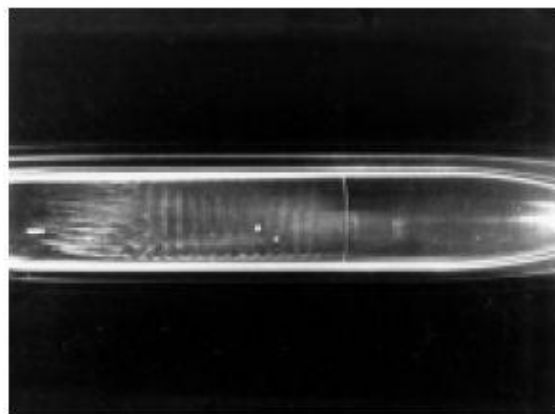


Obr. 2.6 Brownova vizualizácia prúdenia okolo rotujúcej baseballovej lopty: $n = 630/\text{min}$, $v = 24 \text{ m/s}$ [32]

² COHEN, R.S. *Ernst Mach, Physicist and Philosopher*, 1970. Citované podľa [22].

³ VON KARMAN, T. *Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt*, *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse*, 1911. Citované podľa [8].

Po 2. svetovej vojne vyústil dlhoročný výskum *F.N.M. Browna* (1902 – 1976) na Univeristy of Notre Dame (Indiana, USA) v popularizáciu komplexnej priestorovej vizualizácie podzvukového prúdenia pomocou dymu v aerodynamickom tuneli [10]. Jeho konštrukciu tunela s kerosénovým generátorom dymu neskôr prevzali desiatky skúšobných laboratórií. Ako prvému sa mu podarilo pomocou dymu zviditeľniť jav vznikajúci pri prechode laminárnej medznej vrstvy do turbulentnej pri obtekaní rotačného telesa, tzv. *Tollmien – Schlichtingove vlny* (Obr. 2.7).



Obr. 2.7 Brownova vizualizácia prechodu laminárnej medznej vrstvy na turbulentnú; 1957 [10]

Dôležitosť vizualizácie prúdenia zachytáva Brownov výrok z roku 1971: „Človek nie je psom, aby vypátral každú stopu, potrebuje pozorovať, a na základe pozorovania analyzovať.“ Toto tvrdenie v sebe zahŕňa význam prvotnej vizualizácie prúdenia predtým, než pristúpime k dôkladnému meraniu a matematickým modelom [11].

3 INTERPRETÁCIA VIZUALIZÁCIE PRÚDENIA

3.1 CHARAKTERISTIKY PRÚDOVÉHO POĽA

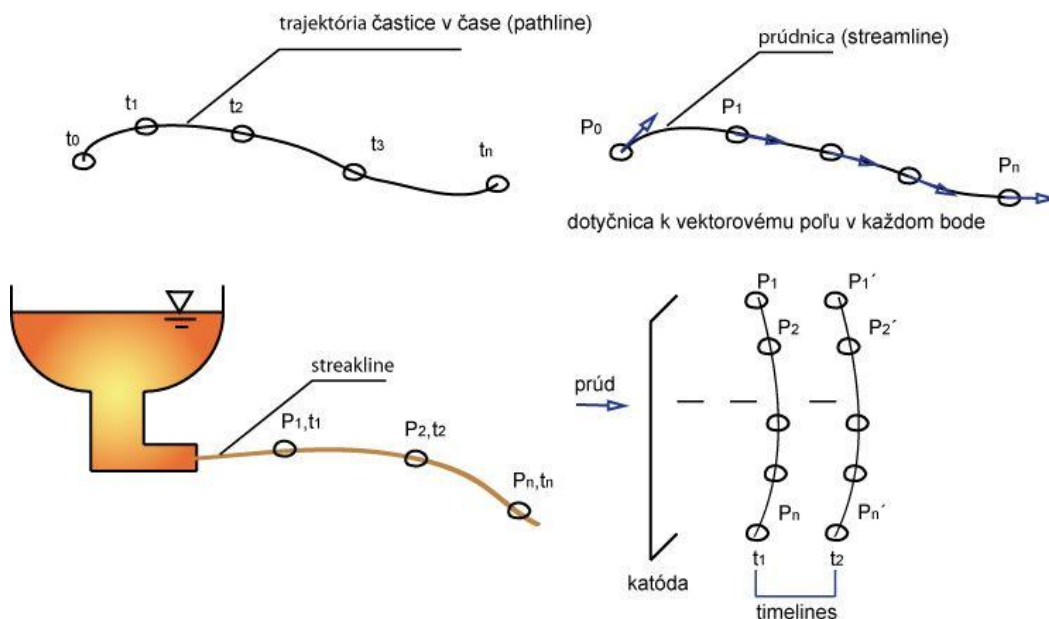
V rámci mechaniky kontinua je rýchlosť prúdenia tekutiny v priestore popísaná vektorovým poľom (rýchlostné pole):

$$\vec{v} = \vec{v}(\vec{x}, t) \quad (3.1)$$

Toto vyjadrenie udáva rýchlosť elementu tekutiny v mieste \vec{x} a čase t . Veľkosť rýchlosti prúdenia je skalárne pole a je rovné dĺžke vektoru rýchlosti:

$$q = \|\vec{v}\| \quad (3.2)$$

Aby sme mohli analyzovať obrazce prúdového poľa získané vizualizačnými metódami, využívame znalosti o zviditeľnených krivkách, ktoré dávajú do vzťahu získané obrazce s kinematickým popisom prúdového poľa.



Obr. 3.1 Krivky získané experimentálnou vizualizáciou prúdenia

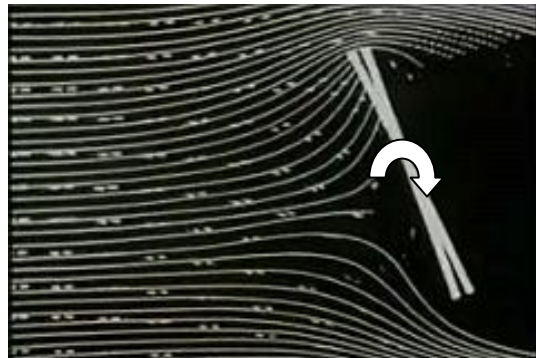
Prúdnice (angl. streamlines) sú integrálne krivky vektorového poľa, ktoré sú v každom mieste dotyčnicami k vektorom rýchlostí prúdového poľa, čo môžeme matematicky popísať nasledovne :

$$\frac{d\vec{x}_s}{ds} \times \vec{v}(x_s) = 0 \quad (3.3)$$

Ak $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ je vektor okamžitej rýchlosti prúdenia v danom bode a $\vec{x}_s = (x_s, y_s, z_s)$ je parametrický popis prúdnice v danom okamihu, dostávame *diferenciálnu rovnicu prúdnice*:

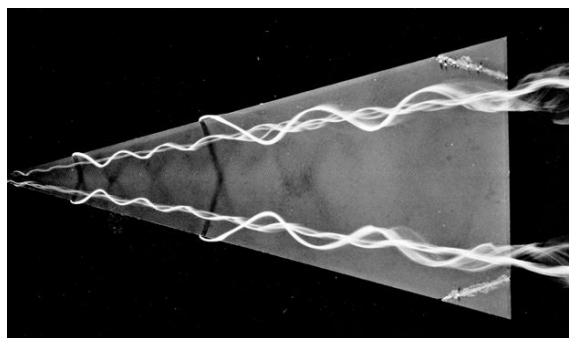
$$\frac{dx_s}{v_x} = \frac{dy_s}{v_y} = \frac{dz_s}{v_z} \quad (3.4)$$

Prúdnice nemajú fyzikálnu paralelu. Jedná sa o matematický koncept, ktorý je však veľmi užitočný pri analýze prúdenia tekutiny [12]. Neexistuje spôsob, ktorým môžeme priamo zobrazit prúdnice, nepriamo však môžeme získať predstavu napr. pri fotografickom snímaní častíc zavedených do kvapaliny s krátkym časom uzávierky [13]. Častice rozptyľujú svetlo a na fotografii sa javia ako krátke línie, ktoré svojou veľkosťou a orientáciou odpovedajú vektorom okamžitej rýchlosti v konkrétnych bodoch. Spojením susediacich stôp týchto častíc vznikajú spojité hladké krivky. Takéto združené znázornenie prúdnic sa nazýva *prúdová sieť* (angl. flow net) [14].



Obr. 3.2 Výsledný prúdnicový obrazec, ktorý vznikol prekrytím dvoch po sebe nasledujúcich snímok, spojením príslušných koncov stôp častíc a dokreslením prúdnic [12]

Streaklines sú krivky, ktoré vznikajú ako dráhy častíc kontinuálne zavádzaných z jedného bodu vektorového poľa, inak povedané sú geometrickým miestom všetkých častíc tekutiny, ktoré v priebehu času prešli jedným konkrétnym bodom v priestore. Streakline fyzikálne odpovedá časticiam kontinuálne vstrekaným do prúdu kvapaliny (napr. obtekanie krídla v aerodynamickom tuneli prúdom dymu) a je ju možné matematicky popísať:



Obr. 3.3 Streaklines – zviditeľnenie vírov nad trojuhelníkovým krídlom [20]

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{v}_p(\vec{x}_p, t) \quad (3.5)$$

$$\vec{x}_p(t = \tau_p) = \vec{x}_{p0}$$

kde \vec{v}_p je rýchlosť častice P v mieste \vec{x}_p a v čase t a τ_p je krivkový parameter, pričom $0 \leq \tau_p \leq t_0$.

Trajektórie častíc (angl. particle pathlines) sú krivky, ktoré odpovedajú dráham jednotlivých častíc v prúdovom poli. Analógiou k trajektórii prúdového elementu je fotografické znázornenie svietiaceho bodu v pohybe pri dlhom čase expozície [13]. Matematicky je možné trajektóriu častice popísať nasledovne:

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{v}_p(\vec{x}_p, t) \quad (3.6)$$

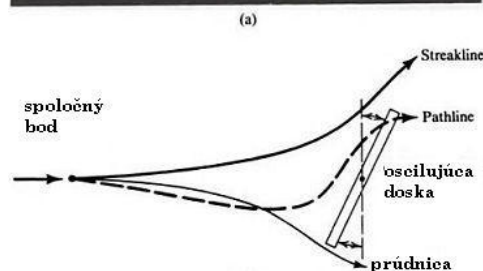
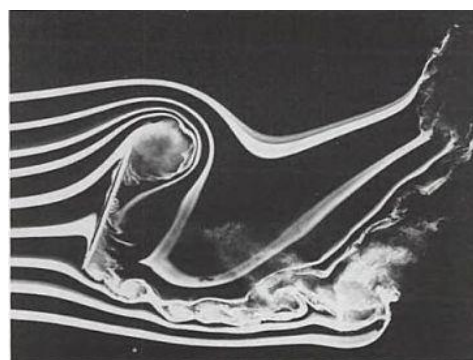
$$\vec{x}_p(t_0) = \vec{x}_{p0}$$

Pri stacionárnom prúdení, kedy je lokálne zrýchlenie rovné nule ($\partial\vec{v} / \partial t = 0$), prúdnicu, streakline a trajektória častice *splývajú* do jednej krivky. Aby sa zdôraznil rozdiel medzi stacionárnym a nestacionárnym prúdením, označuje Faber [14] krivky v stacionárnym poli ako *flowlines*.

Koncepcia vyššie popísaných kriviek sa tak využíva pri nestacionárnom prúdení ($\partial\vec{v} / \partial t \neq 0$), v ktorom je možné tieto krivky rozlíšiť.

Odlišnou skupinou zviditeľňovaných kriviek sú *time lines* („časové línie“), ktoré vzniknú tak, že naraz uvoľníme skupinu častíc ležiacich na jednej priamke alebo v jednej rovine a potom sledujeme ich dráhy [12]. Narozdiel od predchádzajúcich kriviek *time lines* nedokážeme matematicky odvodiť z prúdového poľa. Najefektívnejšie je ich použitie, pokiaľ sú zavádzané kolmo na smer prúdenia, čím dokážeme zviditeľniť rýchlostný profil prúdenia. Na zviditeľnenie rýchlostného poľa môžeme využiť kombináciu streaklines a time lines (Obr. 8.2).

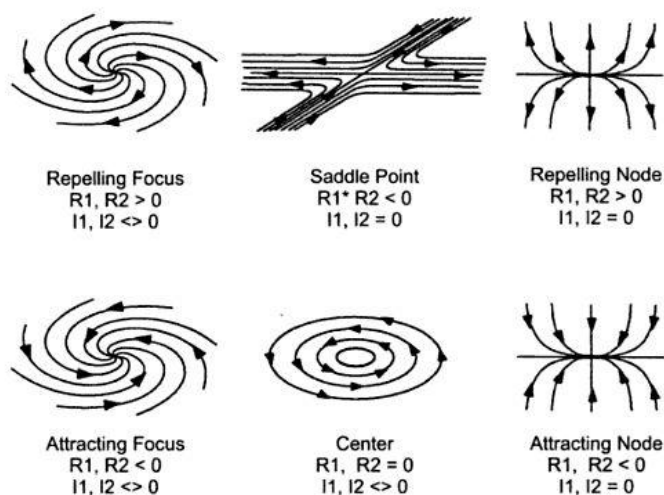
Pri interpretácii záznamov vizualizácie prúdenia je podľa Merzkircha [4] dôležité brať ohľad na *relatívny pohyb* medzi pozorovateľom a sledovaným prúdením. Predchádzajúci popis a obrázky sa viažu na prípady, kedy je pozorovateľ (záznamový systém) v relatívnom pokoji vzhľadom na sledované prúdenie. Je samozrejme možné, aby bol pozorovateľ v relatívnom pohybe. Pri pohybe vlnovou rýchlosťou spolu s prúdom sa môže javiť nestacionárne prúdenie ako stacionárne.



Obr. 3.4 Fotografia a schéma nestacionárneho prúdenia za oscilujúcou doskou [28]

3.2 KRITICKÉ BODY V PRÚDOVOM POLI

Prúdové pole popísané prúdnicami obsahuje špeciálne body, v ktorých nedokážeme určiť smernicu prúdnice a veľkosť rýchlosti je nulová. Tieto body sa nazývajú *kritické* alebo aj *stacionárne* body (angl. critical, stationary points). V prípade, že poznáme priestorové rozloženie týchto bodov, môžeme z neho odvodiť geometriu prúdového poľa,



Obr. 3.5 Kritické body v rovine [7]

nakoľko prúdnice sa môžu spájať len obmedzeným počtom spôsobov [11].

Gradient vektoru rýchlosti prúdenia je tenzor druhého rádu, ktorý zapisujeme ako štvorcovú maticu 3×3 :

$$A_{ij} = \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial x_j} = \mathbf{A} \quad (3.7)$$

kde \vec{v}_i je okamžitá rýchlosť v mieste x_j . Geometriu prúdového poľa môžeme roztriediť na základe štúdia invariantov tenzoru A_{ij} z charakteristickej rovnice:

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (3.8)$$

kde P , Q , R sú 1., 2. a 3. invariant tenzoru A_{ij} a λ sú vlastné čísla tenzoru A_{ij} . Kritické body z dôvodu ich zložitého priestorového popisu znázorňujeme v rovinách, v ktorých ležia vlastné vektory matice \mathbf{A} (angl. eigenvector planes). Pri nestlačiteľnom prúdení je $P=0$ a charakteristická rovnica má tvar:

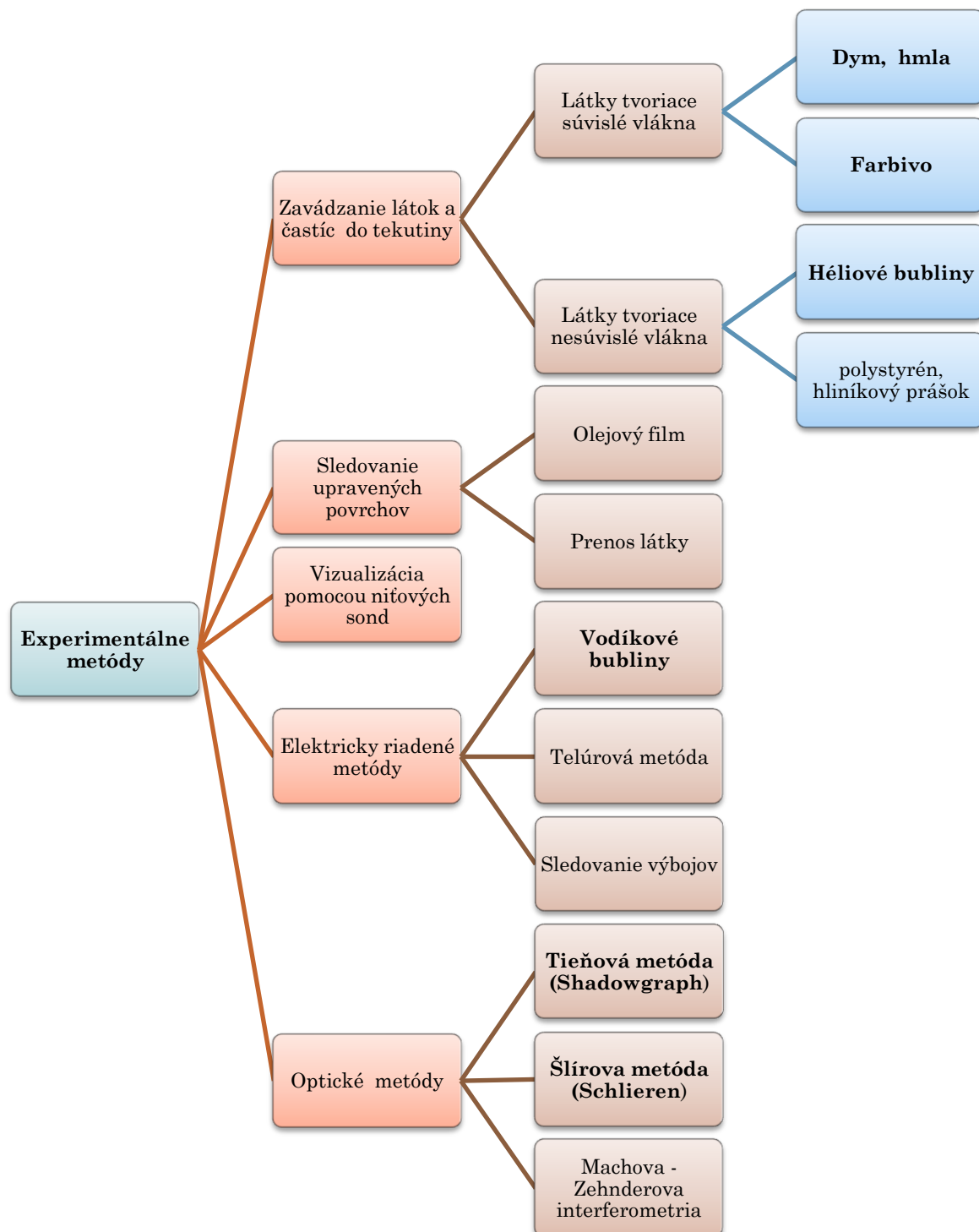
$$\lambda^3 + Q\lambda + R = 0 \quad (3.9)$$

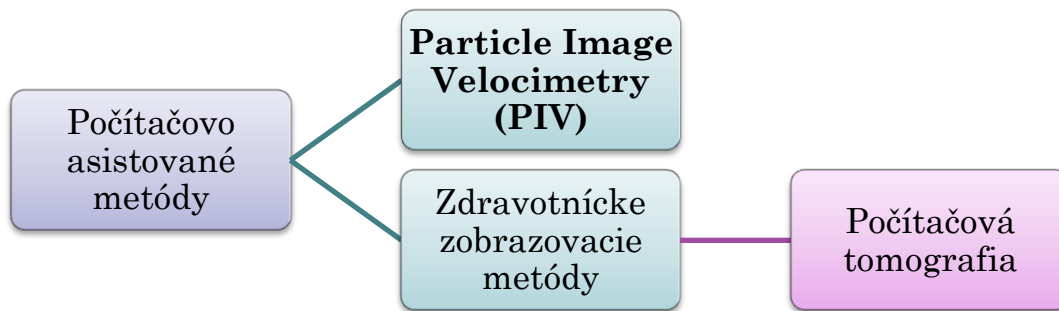
V prípade, že sú reálne zložky vlastných čísel λ nenulové a imaginárne nulové, vznikajú „uzly“ (angl. nodes) a „sedlové body“ (angl. saddle points). Ak sú reálne aj imaginárne zložky vlastných čísel nenulové, vznikajú „ohniská“ (angl. foci, focuses) [11]. Podrobné informácie o matematickom popise kritických bodov je možné nájsť v článku Perryho a Chonga⁴ [11].

⁴ Perry, A.E., Chong, M.S. Description of eddying motions and flow patterns using critical-point concepts. Annual Review of Fluid Mechanics, 19. 1987. s 125-155. Citované podľa [6].

4 ROZDELENIE METÓD VIZUALIZÁCIE PRÚDENIA

Klasifikáciu vizualizačných metód zobrazuje nasledujúca schéma podľa Nakayamu et al. [15], pričom prvotné delenie je na *experimentálne* a *počítačovo asistované metódy*. Schéma zachytáva len najpoužívanejšie metódy.





Schumann [7] klasifikuje vizualizačné metódy podľa toho, v akej veľkej oblasti prúdového poľa je daná metóda aplikovateľná na *elementárne* (zobrazenie vlastností prúdenia vo vybraných bodoch), *lokálne* (zobrazenie vlastností prúdenia v okolí vybraných bodov) a *globálne* (zobrazujú globálne vlastnosti sledovaného prúdenia). Ďalšie rozdelenie je možné na *kvalitatívne* a *kvantitatívne* metódy.

Vizualizácia prúdenia pomocou dymu a farbiva patrí k najstarším metódam. Pomocou nich boli objavené niektoré významné fenomény v mechanike tekutín. Príkladom je Reynoldsov pokus z kapitoly 2 (Obr. 2.2).

5.1 VIZUALIZÁCIA PRÚDENIA KVAPALINY POMOCOU FARBIVA

Zo všetkých vizualizačných techník je táto najľahšie uskutočniteľná. Pomocou tejto metódy môžeme zviditeľniť trajektórie častíc a streaklines.

5.1.1 DRUHY POUŽÍVANÝCH FARBÍV

Najlacnejším používaným farbivom je *potravinárska farba*. Koncentrovaná farba sa musí pred aplikáciou zmiešať s tekutinou s nižšou hustotou ako má voda, aby mal takto získaný roztok neutrálnu vznášavosť. Najčastejšie sa farba zmiešava s malým množstvom alkoholu (metanol, etanol). Ďalej je potrebné, aby bol rozdiel teploty farbiva a kvapaliny minimálny, inak môže dôjsť k neželanej vznášavosti farbiva.



Obr. 5.1 Vizualizácia streaklines pomocou farbiva vo vode [29]

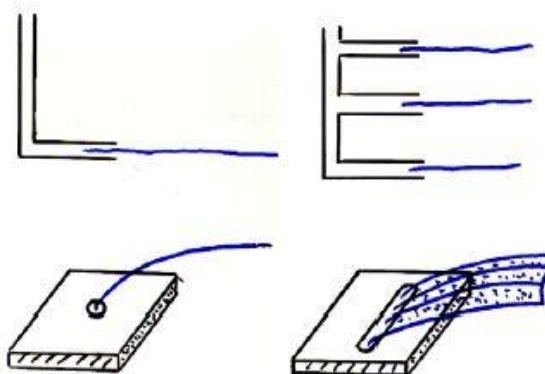
Z bežne dostupných látok sa často používa *mlieko*. Býva preferované kvôli vysokej odrazivosti, ktorá zlepšuje kontrast na fotografických záberoch. Bežne sa používa neupravené alebo s primiešanou potravinárskou farbou. Ďalšou výhodou mlieka je, že mliečny tuk spomaľuje difúziu mlieka s vodou. Na konci experimentu sa musí všetka kvapalina zo vstrekovacieho systému vypustiť, inak sa zvyšné mlieko zrazí a môže upchať trysky, prípadne znehodnotiť nasledujúce experimenty.

Veľmi názorná je vizualizácia pomocou *fluorescenčného farbiva* (angl. fluorescent dye), ktoré pri bežnom osvetlení nevykazuje známky fluorescencie, ale pri osvetlení pomocou argónového laseru alebo UV lampy výrazne fluoreskuje, tzv. *laserom indukovaná fluorescencia (LIF)* (Obr. 5.18). Pri tejto metóde optický filter odstráni excitačné svetlo laseru (použije sa napríklad filter priepustný len pre určité vlnové dĺžky alebo filter, ktorý zadrží všetky vlnové dĺžky pod určitou hranicou) a vidíme tak len emisné svetlo, ktoré generuje fluorescenčný roztok. Medzi používané farbivá patrí napr. *Rhodamin-*

B (tmavá červená), *Rhodamin-6G* (svetlá červená) a *Fluorescein* (hnedočervená – prášok, zelenožltá – pripravený roztok) [11], [16].

5.1.2 SPÔSOBY VSTREKOVANIA FARBIVA

Najčastejšie sa farbivo zavádza do prúdu pomocou sondy vyrobenej z podkožnej ihly alebo nerezovej trubičky s vnútorným priemerom 1,5 – 2 mm. Výhodou takejto sondy je, že ju môžeme posúvať ľubovoľne po prúde do miesta, kde chceme vizualizovať prúdenie. Na druhej strane určitou nevýhodou je ovplyvnenie prúdenia touto sondou, preto sa sonda umiestňuje v určitej vzdialenosti proti prúdu od miesta pozorovania. Farbivo je dávkané buď gravitačným spôsobom zo zásobníka



umiestneného v určitej výške nad skúšobnou aparátúrou alebo kvapaliny [20]

Obr. 5.2 Rôzne spôsoby vstrekovania farbiva do prúdu kvapaliny [20]

z pretlakového zásobníka. Prvý spôsob je ľahšie realizovateľný, a však farbivo dodávané pod tlakom vytvára konzistentnejšiu stopu nezávisle na výške hladiny farbiva v zásobníku. Výstupná rýchlosť farbiva zo sondy by mala byť rovnaká ako rýchlosť prúdenia. Pri dosiahnutí správnej výtokovej rýchlosti tvorí farbivo hladké vlákno.

Ďalšou používanou technikou je zavádzanie farbiva cez otvory na modelovom telese (Obr. 5.1). Pri tejto metóde je dôležité, aby výstupná rýchlosť farbiva z otvorov bola minimálna. Vysoká výstupná rýchlosť by mohla značne ovplyvniť charakter prúdenia. Ak chceme pomocou tejto metódy vizualizovať vírivé prúdenie, mali by byť výstupné otvory umiestnené v mieste, kde sa toto prúdenie generuje [11]. Pokiaľ sa umiestnia výstupné otvory v rade za sebou v smere prúdenia, získame efektívnu priestorovú vizualizáciu (Obr. 5.3).



Obr. 5.3 Vizualizácia vírov na konci krídla v hydrodynamickom tuneli pomocou vstrekovania farbiva; Werlé, 1974 [2]

Je zrejmé, že metóda vstrekovania farby nie je vhodná pre turbulentné prúdenie. Farbivo by ihneď po vstreknutí difundovalo s okolitou kvapalinou a vizualizácia by nebola možná.

5.2.1 GENERÁTORY DYMU A HMLY

Nezávisle na spôsobe generovania musí mať dym alebo hmľa určité vlastnosti:

- Častice musia byť dostatočne malé na to, aby ich pohyb odpovedal pohybu prúdiaceho plynu
- Nesmie významne ovplyvňovať charakter prúdenia
- Musí dobre odrážať svetelné lúče pre tvorbu kvalitných záznamov
- Nesmie byť toxický

Prvé generátory dymu skonštruované v ére počiatkoch letectva určené na obtekanie aerodynamických profilov pracovali na princípe spaľovania tabaku, dreva, pšeničnej slamy alebo vyparovania naftových olejov. Ich hlavnou nevýhodou je tvorba sadzí a sedimentov, ktoré zanášajú dymovod, nehovoriac o ekologickej stránke. Výhodou týchto generátorov je nízka cena a kontinuálny prúd dymu [10].

V súčasnosti je prevažná väčšina generátorov dymu a hmly určených pre zábavný priemysel. K dispozícii sú prenosné generátory dymu a hmly, ktoré pracujú na vodnej alebo olejovej báze.

Náplň generátorov pracujúcich na vodnej báze tvorí z dvoch tretín aktívna látka (glycerol, glykoly, farbivo) a zvyšnú časť čistená voda. Náplň sa čerpá do tepelného výmenníka, kde sa generuje netoxický dym. Tieto generátory sú kompaktné a jednoduché na obsluhu. Napr. generátor *PS27 DRAGON* od firmy *Pea Soup Ltd* (GB) je navrhnutý aj na vizualizáciu prúdenia vzduchu. Veľkou výhodou je veľkosť častíc, ktorých stredný priemer je len 0,2 – 0,3 μm (u bežných generátorov na zábavné účely je priemer do 60 μm). Výhodou je možnosť bezdrôtového ovládania a presná regulácia kontinuálneho výstupu dymu.

Generátory dymu pracujúce na olejovej báze vytvárajú podstatne trvácnejší dym (až 4 hod) než najlepšie z generátorov na vodnej báze súčasne pri nízkej spotrebe náplne. Príkladom je generátor *PS 31 PHANTOM*. Veľkou výhodou je odolnosť dymu voči vysokým teplotám (do 180°C) a malý priemer častíc (0,2 – 0,3 μm). Tento prístroj môže byť dokonca preprogramovaný aby mohol pracovať s náplňou na vodnej báze [17].



Obr. 5.5 generátor hmly PS27 [17]



Obr. 5.4 generátory dymu PS31 a PS33 [17]

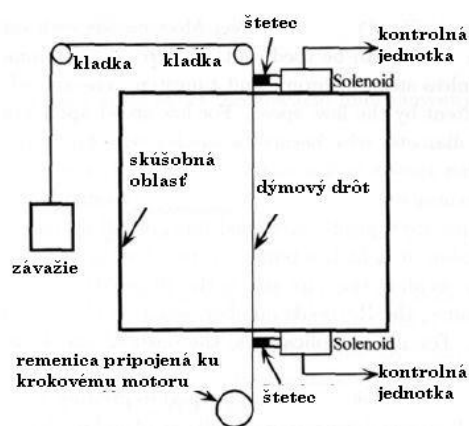
Okrem generátorov dymu sa na vizualizáciu prúdenia plynov využívajú generátory aerosólu, napr. *Aerosolgenerator AGF 2.0IP* od firmy *Palas*. Veľkou výhodou je kompaktnosť zariadenia a možnosť nastavenia požadovanej veľkosti produkovaných častíc (0,25 – 10 μm). Ako náplň sa používa parafínový olej a iné oleje bez obsahu živice. Prístroj pracuje na princípe cyklónovej separácie častíc [18]. Možnou nevýhodou oproti generátorom dymu je malé prietochné množstvo generovaného aerosólu.



Obr. 5.6 generátor aerosólu AGF 2.0iP [18]

5.2.2 PRODUKCIA DYMU POMOCOU DRÔTU (SMOKE WIRE)

Dym sa vytvára odparovaním oleja z povrchu tenkého drôtu, ktorým preteká elektrický prúd. Táto metóda sa dá úspešne použiť na vizualizáciu rôznych úkazov v prúdovom poli aj pri turbulentnom prúdení. V porovnaní s generátormi dymu spomenutými vyššie je táto technika finančne menej náročná a ľahko realizovateľná. Na základnú realizáciu je potrebný kovový drôt, minerálny olej a zdroj elektrického napätia.



Obr. 5.7 Zariadenie na automatické nanášanie oleja na drôt [11]

Materiál drôtu je najčastejšie nerezová oceľ alebo wolfram. Prierez drôtu sa volí priamo úmerne podľa rýchlosti prúdenia, ktoré chceme vizualizovať. Pri vyšších rýchlostiach (jednotky metrov za sekundu) je potrebný väčší prierez, pretože väčšia plocha drôtu umožňuje vyprodukovať väčšie množstvo dymu a lepšie odoláva ťahovému namáhaniu za vyšších teplôt, keďže drôt musí byť napnutý. Pre väčšinu aplikácií je podľa Smitsa a Lima [11] optimálny priemer drôtu 0,1 mm.

Existuje množstvo olejov, ktoré sú použiteľné pre túto metódu. Najčastejšie sa používa *parafín, kerozín alebo silikónový olej*. Pre dobrú vizualizáciu je potrebné zabezpečiť rovnomerné nanášanie oleja na drôt, čo je možné vykonať manuálne vždy po nejakom časovom intervale pomocou štetca alebo automaticky. V literatúre sa spomínajú rôzne konštrukcie zariadení na automatické nanášanie oleja. Smits [11] považuje za najlepšie riešenie

konštrukciu podľa Liu a Ng ⁵ (Obr. 5.7). Drôt je vedený cez kladky a napínaný závažím mimo skúšobného zariadenia. Krokový motor navíja drôt na kladku s posunom rovným dĺžke aktívnej časti drôtu v testovacom zariadení. Pri navíjaní je k drôtu pritlačený štetec namočený v oleji. Podľa smeru navíjania sa aktivuje buď horný alebo dolný štetec.

V súčasnosti je na trhu generátor dymu metódou „smoke wire“ MS-405 od japonskej firmy *Sugawara*, ktorý je navrhnutý pre vizualizáciu prúdenia vzduchu do rýchlosti 4 m/s [19].

5.2.3 ZVIDITELŇOVANIE V DYMOVOM TUNELI

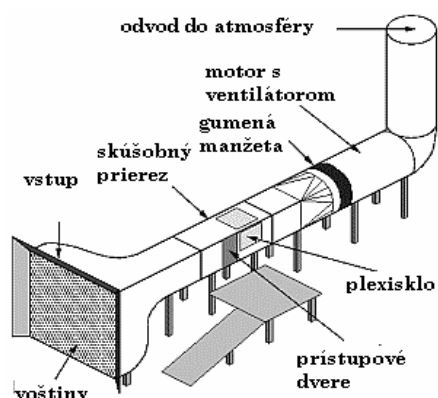
Dym vytvorený pomocou generátorov alebo dymiaceho drôtu je vedený do špeciálneho skúšobného tunela.

Dymové tunely sa líšia od aerodynamických vo veľkom pomere zúženia konfúzora (1:9 až 1:96) a zariadením na zníženie turbulencie na vstupe do tunela.

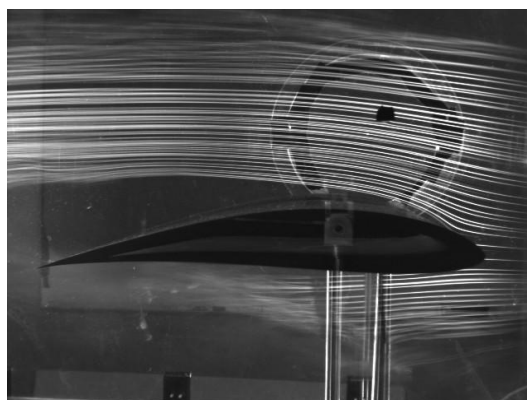
Kvôli odvádzaniu dymu alebo hmly bývajú na konci otvorené. Snahou je, aby bola úroveň turbulencie privádzaného prúdenia v testovacej sekcii minimálna.

Na začiatku tunela je umiestnená komora pozostávajúca z voštín a clôn, ktorých úlohou je zrušiť turbulentné prúdenie dymu privádzaného do tunela. Konfúzor zabezpečuje, aby bola rýchlosť prúdenia na začiatku testovacej sekcii po priereze v každom mieste približne rovnaká (piestový rýchlostný profil) [11].

Generátory dymu umožňujú priestorové obtekanie skúšobného telesa, dym vzniknutý odparovaním oleja z drôtu umožňuje obtekanie profilu v rovine.



Obr. 5.8 Dymový tunel pre nízke rýchlosti [33]

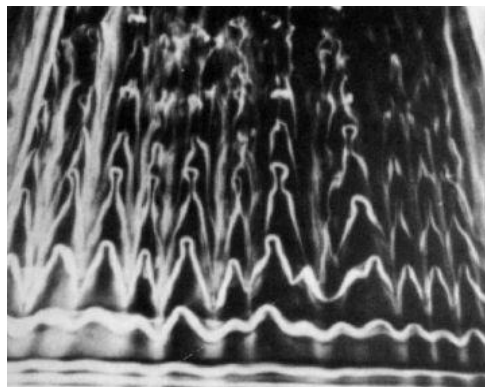


Obr. 5.9 Obtekanie krídla dymom generovaným pomocou metódy smoke wire [34]

⁵ Liu, C.Y., Ng, K.L. Low-cost mini smoke tunnel with automatic smoke wire fuelling mechanism, 1990. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 18 (2), s. 85-91. Citované podľa [11].

5.2.4 ZVIDITELŇOVANIE VO VOLNOM PRIESTORE

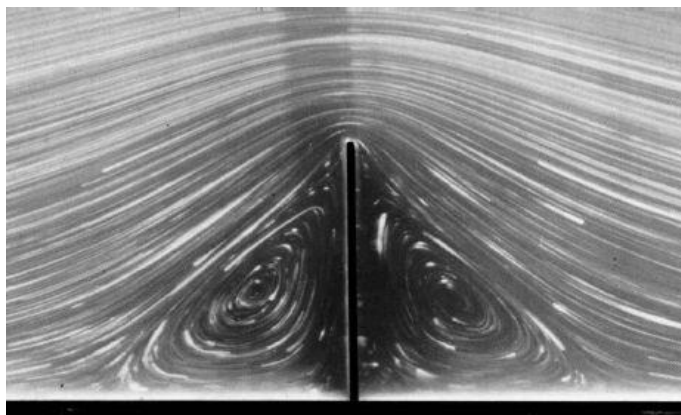
Technika zviditeľňovania charakteristík prúdového poľa vo vzduchu pomocou dymu je principiálne rovnaká ako vstrekovanie farbiva do kvapaliny pomocou trysiek alebo otvorov v obtekaných telesách. Na rozdiel od farbiva vo vode však dochádza k difúzii dymu so vzduchom rýchlejšie [20].



Obr. 5.10 Vstrekovanie dymu cez štrbinu; vizualizácia prúdenia v medznej vrstve; pohľad zhora [20]

5.3 VIZUALIZÁCIA PRÚDENIA KVAPALINY ZAVÁDZANÍM JEDNOTLIVÝCH ČASTÍC

Rozšírenou metódou vizualizácie prúdenia kvapalín je zavádzanie častíc (v porovnaní s časticami dymu alebo farbiva mnohonásobne väčšie a rozlíšiteľné voľným okom) do objemu kvapaliny. Ako častice sa používajú drevené piliny, kovový prach, kvapôčky oleja alebo vzduchové bubliny. Táto metóda sa používa



Obr. 5.11 Vizualizácia stacionárneho prúdenia, kde je zreteľne viditeľné odtrhnutie prúdenia pred a za prekážkou; hliníkový prášok v glyceríne [32]

predovšetkým na vizualizáciu dvojrozmerného prúdenia vo zvolenom reze [1]. Vo všeobecnosti by mali použité častice spĺňať nasledujúce požiadavky:

- nesmú chemicky reagovať s kvapalinou (korózia)
- netoxické
- vysoký stupeň odrazivosti svetla
- hustota približne rovnaká ako hustota kvapaliny (neutrálna vznášavosť)

Požadovaná veľkosť častice sa volí podľa rozmerov skúšobného zariadenia a kvality záznamového systému. Vo všeobecnosti by mali byť častice čo najmenšie.

Aby sme dosiahli vyrovnanie hustoty experimentálnej kvapaliny a zavádzaných častíc, môžeme upraviť hustotu jednej aj druhej zložky. Pokiaľ to podmienky experimentu dovoľujú, je možné do vody primiešať glycerín

(hustota 1,26 g/cm³). Najčastejšími časticami zavádzanými do vody sú *polystyrénové guľôčky* (nespenený polystyrén) a *hliníkový prášok*. Hustotu polystyrénu môžeme znížiť jeho ošetrovaním pomocou acetónu. Vyrovnaním hustôt sa snažíme zabrániť účinkom vztlakovej sily pôsobiacej na častice. Každopádne okrem vztlaku treba brať v úvahu veľkosť rýchlosti v smere tiažového zrýchlenia, ktorú vyjadruje Stokesov zákon:

$$v_s = (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p^2 / 18 \cdot \mu_f \quad (5.1)$$

kde v_s je sedimentačná rýchlosť častice, ρ_p hustota materiálu častice, ρ_f hustota tekutiny, g tiažové zrýchlenie, d_p priemer častice a μ_f dynamická viskozita kvapaliny. U hliníkových častíc nie je možná úprava hustoty ako u polystyrénu. Tieto častice sú však natolko malé, že podľa Stokesovho zákona je rýchlosť klesania zanedbateľná.

Zariadenie, ktorým sa privádzajú častice do prúdenia by nemalo ovplyvňovať prúdové pole, prípadne by malo byť umiestnené v dostatočnej vzdialenosti od testovacej sekcie proti prúdu.

Pomocou častíc je možné sledovať prúdenie aj na voľnej hladine. V tomto prípade sa volia ľahké častice, ktoré plávajú na hladine (*hliníkový prášok*, *lycopodium*, *teflonový prášok Hostaflon*). Pomocou tejto metódy je možné pozorovať tvorbu vírov na hladine za obtekaným telesom. Kvôli povrchovému napätiu však pohyb častíc na hladine nemusí odpovedať obtekaniu telesa v objeme pod hladinou [4].



Obr. 5.12 Vizualizácia úplavu na hladine za obtekaným sférickým telesom; hliníkový prášok na vodnej hladine [32]

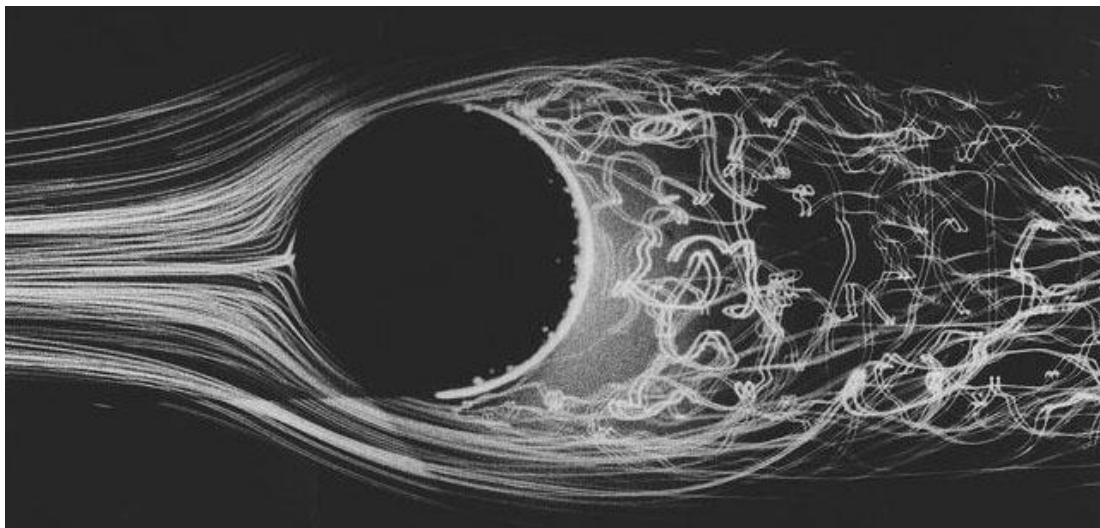
Sledovaním pohybu jednotlivých častíc je možné vypočítať ich trajektóriu za rôznych podmienok. Potrebný matematický aparát je uvedený v [4]. Nasledujúca tabuľka zobrazuje prehľad používaných častíc.

Kvapalina	Častice	Priemer častíc	Aplikácia
Voda	Hostaflon (PTFE)	10 – 300 μm	Prúdenie na hladine
Voda	Hliníkový prášok	0,03 – 0,1 mm	Prechod medznej vrstvy
Voda	Kozmetický púder	30 μm	Vírivé prúdenie
Voda	Polystyrén	0,01 – 0,2 mm	Prúdenie v úplave
Slaná voda	Hliníkový prášok	0,03 – 0,1 mm	Laminárne prúdenie
Voda a glycerín	Polystyrén	0,01 – 0,2 mm	Konvektívne prúdenie

Tabuľka 5.1 [4]

5.4 VIZUALIZÁCIA PRÚDENIA VZDUCHU POMOCOU HÉLIOVÝCH BUBLÍN

Častice látok zavádzaných do tekutiny pri predchádzajúcich vizualizačných metódach majú mikroskopické rozmery príliš malé na rozlíšenie ľudským okom. Ako už bolo spomínané v predchádzajúcich kapitolách, sú tieto metódy nevhodné na vizualizáciu turbulentného prúdenia, pretože dochádza k rýchlej disipácii častíc do tekutiny, čím je znemožnená akákoľvek vizualizácia prúdenia. Prielom vo vizualizácii prúdenia vzduchu nastal s uvedením praktickej aplikácie mydlových bublín plnených héliom v 60. rokoch 20. storočia [21]. Héliové bubliny s priemerom zvyčajne okolo 3 mm verne kopírujú prúdnicu vzduchu do ktorého sú zavádzané z dôvodu ich *neutrálnej vznášavosti* (priemerná hustota bubliny je rovnaká ako hustota vzduchu). Vďaka tejto vlastnosti bubliny pretečú okolo lopatiek ventilátora aj pri vysokých otáčkach bez porušenia. Ich použiteľnosť je možná až do nadzvukovej rýchlosti.



5.13 Vizualizácia prúdenia okolo valcového telesa pomocou héliových bublín [21]

Roztok na tvorbu bublín obsahuje plastifikátor, ktorý predlžuje reálnu životnosť bublín rádovo na niekoľko minút, zvyčajne 1 – 2 minúty.

Pre najlepšiu viditeľnosť sa prúd bublín osvetľuje v smere prúdenia a pozoruje sa kolmo na smer prúdenia oproti tmavému pozadiu. Pokiaľ osvetlenie pulzuje so známou frekvenciou môžeme na základe dráh bublín medzi jednotlivými zábleskami určiť ich rýchlosť a tým pádom aj rýchlosť prúdenia vzduchu.

Výsledky sledovania prúdenia môžu byť zaznamenané fotograficky alebo pomocou videokamery konvenčnými zariadeniami. Nespornou výhodou tejto metódy sú široké možnosti použitia vo všetkých odvetviach inžinierskej činnosti, kde sa rieši prúdenie vzduchu.

5.4.1 GENERÁTOR HÉLIOVÝCH BUBLÍN SAI MODEL 5

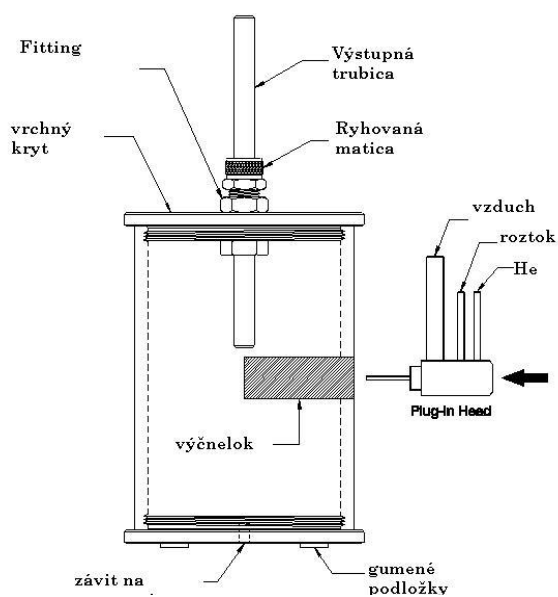
V posledných štyroch desaťročiach sa vývojom a predajom generátorov héliových bublín a príslušnej aparatury zaoberá firma *SAGE Action, Inc.* z New Yorku, USA. V súčasnosti predávaný „Model 5“ som mal v čase písania tejto práce k dispozícii na Odbore termomechaniky a techniky prostredia a bol pomocou neho realizovaný jednoduchý experiment zdokumentovaný v kapitole 12.

Celé zariadenie aj s príslušenstvom je uložené v pevnom puzdre určenom na prenášanie. Héliové bubliny s nastaviteľným priemerom od 0,1 do 4 mm môžu byť generované simultánne v oboch nádobách, ktoré sú malými cyklónovými filtrami. Bublinky sa tvoria v generačných hlavách, kde sú koncentricky usporiadané trubice prívodu hélia a mydlového roztoku a hnané stlačeným vzduchom následne vletujú do cyklónového filtra, kde sú separované podľa hmotnosti. Výsledné radiálne sily separujú bubliny, ktoré nemajú neutrálnu vznášavosť.

Externé prívody hélia a stlačeného vzduchu sú pripevnené ku konzole cez rýchlospojky. Roztok na tvorbu bublín je umiestnený v plastovom valci pod ovládacími prvkami. Každý vstup je opatrený mikrometrickým ventilom pre možnosť presného opakovaného nastavenia podmienok experimentu [21]. Technické parametre generátora sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.



5.14 Generátor héliových bublín SAI Model 5 [21]



Obr. 5.15 Nákres hlavných častí generátora [21]

Rýchlosť tvorby bublín	300 – 400 /min
Priemer bublín	1 – 4 mm
Životnosť bublín	1 – 2 min
Pracovný tlak hélia	regulovaný na 20 psi (138 kPa)
Pracovný tlak vzduchu	30 – 60 psi (200 – 400 kPa)
Doporučený roztok	SAI 1035 BFS (nezistené zloženie)
Prietok hélia	200 cm ³ / min / hlava
Prietok vzduchu	34 dm ³ /min / hlava
Spotreba roztoku	50 cm ³ / hod / hlava

Tabuľka 5.2 [21]

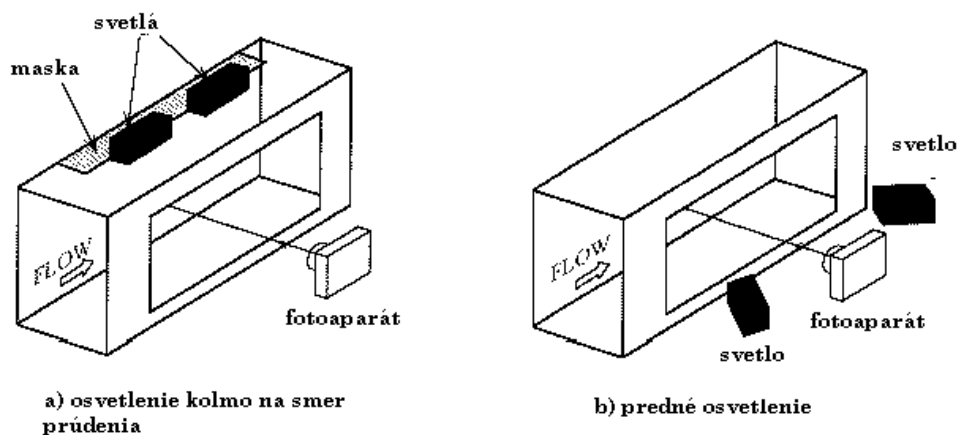
5.5 OSVETLENIE SKÚŠOBNEJ TRATE PRI ZAVÁDZANÍ LÁTKO DO TEKUTINY

Pre zaznamenávanie snímok prúdenia v dymovom či vodnom tuneli a celkovo vo vizualizácii prúdenia zavádzaním látok do objemu tekutiny má zásadnú úlohu spôsob osvetlenia. Vo všeobecnosti sa snažíme vždy dosiahnuť čo najvyšší kontrast [20]. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené vlastnosti používaného osvetlenia.

Osvetlenie	Intenzita	Rozptyl	Potreba synchronizácie s fotoaparátom
Stále svetlo	Nízka	Veľký	Nie
Zábleskové svetlo (stroboskop)	Vysoká	Veľký	Áno
Laserový svetelný rez	Vysoká	Malý	Nie
Pulzujúci laserový svetelný rez	Veľmi vysoká	Malý	Áno

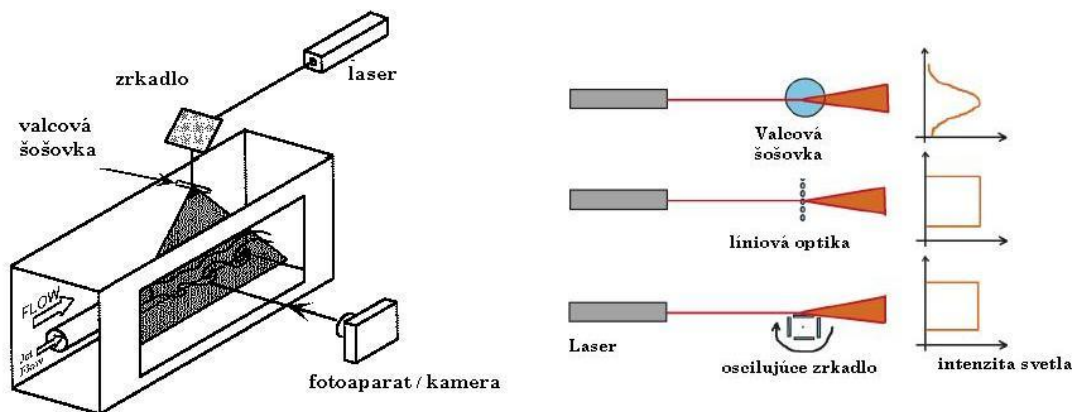
Tabuľka 5.3 [20]

Konvenčné zdroje svetla (bodové svetlá, žiarivky, stroboskopy) sa využívajú na vizualizáciu vonkajších charakteristík prúdenia. *Laser* sa často používa na vizualizáciu vnútornej štruktúry prúdenia (koncentrácia častíc).



Obr. 5.16 Usporiadanie vonkajšieho osvetlenia [11]

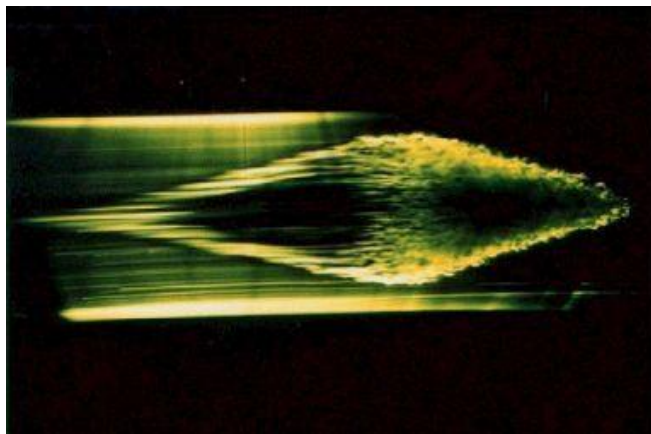
Umiestnenie vonkajšieho osvetlenia má vplyv na kvalitu fotografického záznamu. Voľba polohy svetelných zdrojov závisí na konkrétnej aplikácii. V dymových a vodných tuneloch s tmavým pozadím je preferované osvetlenie kolmo na smer prúdenia. Naopak pri bielom pozadí je lepšie osvetlenie spredu. Pre väčšinu vizualizačných experimentov, kde rýchlosť prúdenia nie je veľmi vysoká, postačuje stále konvenčné osvetlenie. Pri rýchlom prúdení je potrebné stroboskopické osvetlenie synchronizovať s uzávierkou fotoaparátu.



Obr. 5.17 Osvetlenie pomocou laseru [11]

Laser sa používa na zviditeľnenie prúdenia v zvolenej rovine. Pre túto aplikáciu sa musí laserový lúč rozšíriť do roviny (angl. laser sheet), čo je možné realizovať pomocou valcovej šošovky (sklenená tyč), oscilujúcich zrkadiel alebo líniovej optiky. Najjednoduchšia je realizácia pomocou valcovej šošovky, dosahuje však najnižšiu intenzitu svetla. Optimálne osvetlenie dosiahneme pomocou líniovej optiky. Pri tejto metóde sú aj nižšie nároky na výkon laseru [20]. Podľa Smitsa a Lima [11] postačuje na väčšinu vizualizačných aplikácií laser s konštantnou vlnovou dĺžkou a amplitúdou (CW laser) s výkonom 4 – 5 W.

Na fotografii získanej pri osvetlení laserovým svetelným nožom môžeme rozlíšiť rozloženie koncentrácie častíc, pričom svetlé plochy predstavujú miesta s najvyššou koncentráciou častíc zavádzanej látky [20]. Pri vizualizácii trojrozmerného prúdenia je možné osvetliť celý priestor, ale presné vyhodnotenie by vyžadovalo holografický záznam objektu [1].



Obr. 5.18 vizualizácia prúdenia fluorescenčných častíc laserovým rezom – laserom indukovaná fluorescencia [20]

6 ZVIDITEĽNENIE PRÚDENIA SLEDOVANÍM UPRAVENÝCH POVRCHOV

Pokrytím povrchu telesa špeciálnym náterom alebo povlakom nám umožňuje zviditeľniť charakter prúdenia tekutiny v tesnej blízkosti povrchu. Pomocou rôznych náterov je tiež možné zviditeľniť lokálne rozloženie tlakov a teplôt na povrchu. Informácie o týchto metódach je možné nájsť v [22].

Parametre prúdenia sa rýchlo menia v závislosti na normálnej vzdialenosti od obtekaného povrchu, preto pri zviditeľňovaní prúdenia v blízkosti povrchu je možné očakávať, že pôvodné prúdenie bude do určitej miery ovplyvnené prítomnosťou látky na sledovanom povrchu. Získané obrazce umožňujú len kvalitatívne posúdenie prúdenia.

Tradičnou metódou je aplikácia *olejového náteru* (angl. oil surface flow visualization), ktorá sa často využíva v experimentálnej aerodynamike [20]. Náter, ktorý sa nanáša na sledovaný

povrch sa pripravuje z *rozpúšťadla*, ktorým môže byť petrolej, motorový olej alebo transformátorový olej. Do rozpúšťadla sa potom primiešavajú vo vhodnom množstve *jemné častice*, najčastejšie fluorescenčná prášková farba, olejové sadze alebo kaolín. Koncentrácia pigmentu býva zvyčajne 4 – 5%. Pripravený náter má byť hladký, preto sa nanáša striekacou pištoľou [1]. Viskozita náteru sa prispôbuje podľa konkrétnej aplikácie. Náter by mal zanechávať jasne rozlíšiteľné prúžkové vzory, čo je tiež dôležité pre dobrú kvalitu fotografického záznamu. Ako aditívum sa používa kyselina olejová, ktorá zabraňuje koagulácii farebných pigmentov. Pomocou tejto metódy môžeme zviditeľniť povrchové prúdnice, prechod laminárneho prúdenia na turbulentné, odtrhnutie prúdenia či bod nulovej rýchlosti.

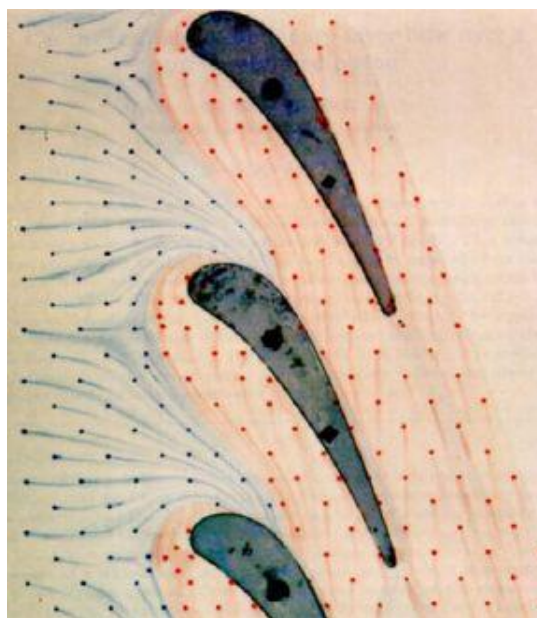
Ak predpokladáme, že rýchlosť náteru na povrchu je nulová a rýchlosť prúdenia vzduchu a náteru na ich spoločnom rozhraní je rovnaká, je možné zanedbať vplyv náteru na prúdenie vzduchu. Za dostatočne presné môžeme považovať obrazce vzniknuté pri obtekaní telesa vzduchom, pokiaľ sa rýchlosť prúdenia prudko nemení v čase. Hoci táto metóda umožňuje len kvalitatívne posúdenie, je veľmi užitočná v miestach, kde iné metódy zlyhávajú, napr. v mieste prechodu medzi trupom a krídlom letúnu (Obr. 6.1) [4].



Obr. 6.1 Vizualizácia prúdenia v blízkosti povrchu pomocou olejového náteru v oblasti prechodu trupu a krídla klzáku [20]

Metódu upravených povrchov je možné využiť aj pri obtekaní kvapalinou. Skúšobné teleso sa natrú hrubou vrstvou olejovej farby a následne sa ponorí do kvapaliny. Vplyvom prúdenia vznikajú v nátere jemné ryhy, ktoré indikujú smer prúdenia v danom mieste. V mieste odtrhnutia prúdenia sú ryhy neprítomné, čím je možná jeho ľahká lokalizácia [1].

Modifikáciou metódy olejového náteru je *aplikácia diskretných bodov indikátorovej kvapaliny* na povrch telesa miesto aplikácie náteru na celý povrch. Obrázky vzniknuté touto metódou poskytujú lepší náhľad na smer prúdenia a nie je potrebné používať aditívum proti koagulácii pigmentu. Ako indikátorová kvapalina sa pre názornosť môže použiť farebný atrament. (Obr. 6.2) Pri vertikálnych plochách je potrebné brať v úvahu vplyv tiažového zrýchlenia [20].



Obr. 6.2 Zviditeľnenie prúdenia v modelovej lopatkovej mreži pomocou prenosu farebného atramentu [20]

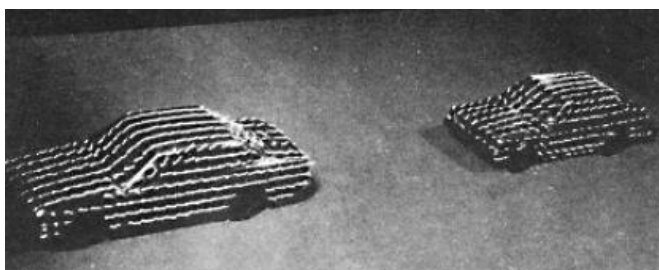
Metóda niťových sond (angl. tuft method) sa používa na zviditeľnenie prúdenia vzduchu v blízkosti povrchu trupov lietadiel, karosérií automobilov, v technike prostredia na zviditeľnenie prúdenia vzduchu v miestnosti a taktiež v hydrodynamike [15].

Pripevnením krátkych vlákien jedným koncom na povrch skúšobného telesa jednoducho zviditeľníme smer prúdenia. Pri laminárnom prúdení indikujú tieto vlákna smer vektoru rýchlosti v danom mieste. Pri nestacionárnom prúdení vykazujú vlákna nestabilný pohyb, čo môže indikovať, že sa nachádzajú v turbulentnej oblasti a prudké trhavé pohyby spôsobuje oblasť odtrhnutia prúdu. Osvedčeným materiálom na výrobu niťových sond je *nylonové vlákno*. Rýchlosť prúdenia by nemala klesnúť pod 1 – 2 m/s aby tuhosť materiálu a tiažové zrýchlenie neovplyvnili výsledky experimentu. Najvhodnejšia rýchlosť prúdenia je podľa Merzkircha [4] okolo 30 m/s, kedy už výsledky experimentu nie sú ovplyvnené spomínanými faktormi. Dĺžka jednotlivých sond by nemala byť viac ako 2 cm, pričom platí, že ich dĺžka by mala byť menšia než predpokladaný polomer krivosti prúdnic v danom mieste.



Obr. 7.1 Zviditeľnenie prúdenia za osobným automobilom pomocou mriežky s niťovými sondami [20]

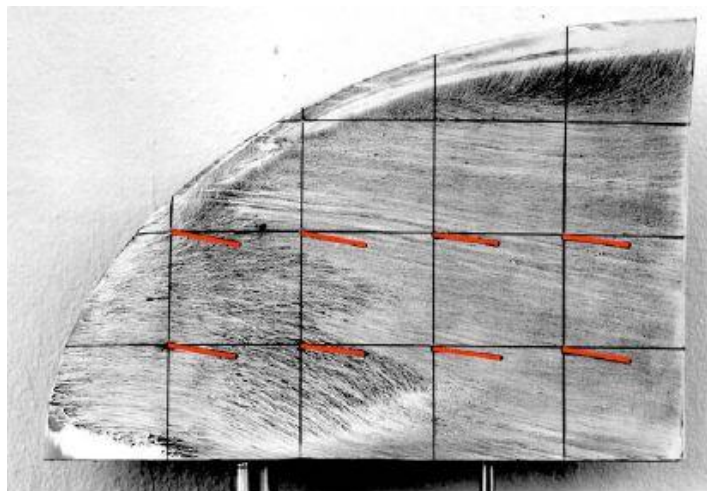
Niťové sondy sa tiež často aplikujú na zviditeľnenie prúdenia vo veternom tuneli vo zvolenom reze a vo zvolenej vzdialenosti od skúšobného telesa pomocou jemnej drôtenej mriežky (angl. tuft grid method), na ktorej sú sondy jedným koncom prilepené (Obr. 7.1). Pri tejto aplikácii je odporúčaná dĺžka vlákien 5-násobkom mriežkovej vzdialenosti [20]. Okrem



Obr. 7.2 Osvetlenie fluorescenčných niťových sond UV lampou [15]

kvalitatívnej vizualizácie prúdového poľa je možné získať kvantitatívne dáta meraním zložiek rýchlostí v normálnej rovine. Pri vyhodnocovaní výsledkov musí byť braná do úvahy poloha fotoaparátu, nakoľko môže ovplyvniť prúdenie.

V 80. rokoch 20. storočia sa začali používať fluorescenčné niťové sondy miniatúrnych rozmerov (angl. fluorescent mini-tufts) na vizualizáciu prúdenia v aplikovanej hydrodynamike.⁶ Na modelové teleso sa pripevní veľké množstvo jemných niťových sond, ktoré boli predtým ošetrené fluorescenčnou farbou. Zviditeľnenie prúdenia získame osvetlením pomocou UV žiarenia. Veľkou výhodou okrem názornosti tejto metódy je, že jemné vlákna zanedbateľne ovplyvňujú prúdenie, čím získame presnejšie výsledky než u bežných niťových sond.



Obr. 7.3 Zviditeľnenie prúdenia v blízkosti povrchu winglety klzáku; realizácia vo veternom tuneli na TU Stuttgart [20]

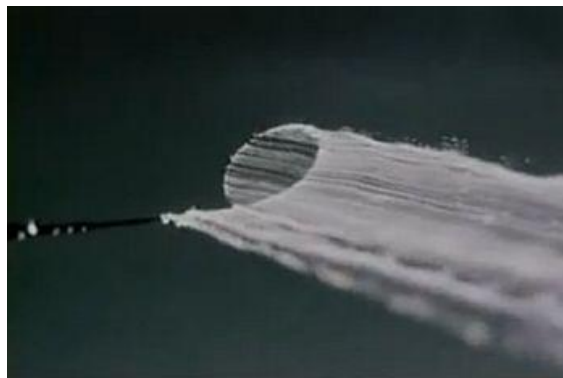
V praxi sa tiež využíva kombinácia niťových sond spolu s olejovým náterom na povrchu telesa, ktorá bola spomenutá v kapitole 5.2.

⁶ Treaster, A.L., Stinebring, D.R. *The use of fluorescent mini-tufts for hydro-dynamic flow visualization*, 1980. Citované podľa [15].

Spoločnou charakteristikou týchto metód je, že stopovacia látka (angl. tracer) vzniká účinkom pôsobenia elektrického prúdu. Výhodou je možnosť presnej regulácie pomocou elektronických obvodov. Medzi tieto metódy býva zaraďovaná aj metóda „smoke wire“ popísaná v podkapitole 5.2.2.

8.1 METÓDA VODÍKOVÝCH BUBLÍN

Metóda vodíkových bublín sa úspešne využíva v experimentálnej mechanike tekutín posledných 50 rokov. Metóda je založená na elektrolytickom rozklade vody podľa rovnice: $2H_2O = 2H_2 + O_2$ a je možné pomocou nej zviditeľniť prúdnice a „časové línie“ (kap. 3) vo vode pri malých rýchlostiach (do 1 m/s).

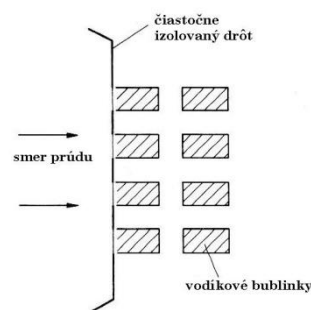


Obr. 8.1 Vznik vodíkových bubliniek na katóde [12]

Výhodou tejto metódy je jej všestrannosť. Sondy môžu byť umiestnené kdekoľvek v prúde vody ľubovoľne orientované pri zanedbateľnej interferencii s prúdením. Ďalšou výhodou sú nízke náklady na zaobstaranie a jednoduchosť používania.

8.1.1 APARATÚRA NA GENEROVANIE VODÍKOVÝCH BUBLÍN

Vodíkové bubliny sa tvoria na tenkom drôte, ktorý je napnutý medzi dvomi vodivými podporami a je zapojený ako záporná elektróda (katóda) jednosmerného elektrického obvodu. Druhá elektróda (anóda) je buď kovová alebo uhlíková a často býva umiestnená v určitej vzdialenosti po prúde od katódy. V prípade, že by bol drôt zapojený ako anóda, nevytvárali by sa vodíkové ale kyslíkové bublinky, ktoré sú pre vizualizáciu nevhodné, pretože majú väčšiu veľkosť ako vodíkové a vplyvom vztlaku by nekopirovali priebeh prúdenia. Vytvárané vodíkové bubliny majú priemer približne 0,5 – 1 – násobok priemeru drôtu. Základnou požiadavkou pre tvorbu vodíkových bublín je zdroj jednosmerného napätia U s nastaviteľným rozsahom minimálne 50 – 70 V. Čím dlhší drôt (prípadne niekoľko drôtov),



Obr. 8.2 spôsob generovania kombinovaných markerov [4]

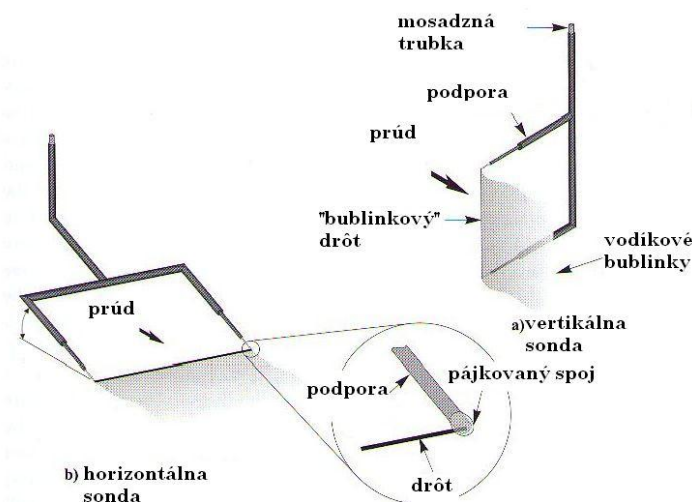
tým je potrebné vyššie napätie. Konkrétne je v [11] uvedené potrebné napätie 150V a prúd $I=0,5 - 1$ A pre drôt dĺžky 150 – 200 mm. Pokiaľ je obvod neustále zopnutý, vytvárajú vodíkové bublinky súvislú plochu, ktorá sa po prúde deformuje podľa lokálnych charakteristík prúdového poľa. Proces tvorby bublín je možné periodicky prerušovať, čím vznikajú „časové línie“, ktoré umožňujú kvalitatívne aj kvantitatívne posúdenie prúdového poľa (veľkosť lokálnej rýchlosti). Pre tieto účely sa k zdroju napätia pripája generátor obdĺžnikového priebehu napätia (MOS tranzistor). Pokiaľ sa určité časti drôtu zaizolujú, vznikajú pri pulzujúcom napätí kombinované markery obdĺžnikového tvaru (angl. combined time-streak markers) [4]. Tento spôsob vizualizácie je veľmi dobre popísaný v Klineovom výukovom filme [12].



Obr. 8.3 Predĺženie kombinovaných markerov po zúžení prierezu indikuje nárast lokálnej rýchlosti prúdenia [4]

Keďže tvorba vodíkových bublín je dôsledkom elektrolýzy, má samotný elektrolyt vplyv na kvalitu vizualizácie. V literatúre [11] je odporúčané pre dosiahnutie optimálnej tvorby vodíkových bublín pridať do vody z vodovodu 0,12 g síranu sodného (Na_2SO_4) na liter.

Samotné sondy na generovanie bublín (angl. bubble probes) sa môžu umiestniť horizontálne aj vertikálne. Horizontálne usporiadanie je vhodné, pokiaľ chceme zviditeľniť prúdenie v blízkosti povrchu obtekaného telesa. Vertikálne umiestnenie je vhodné, pokiaľ chceme skúmať zmenu rýchlosti prúdenia kolmo k obtekanému povrchu.



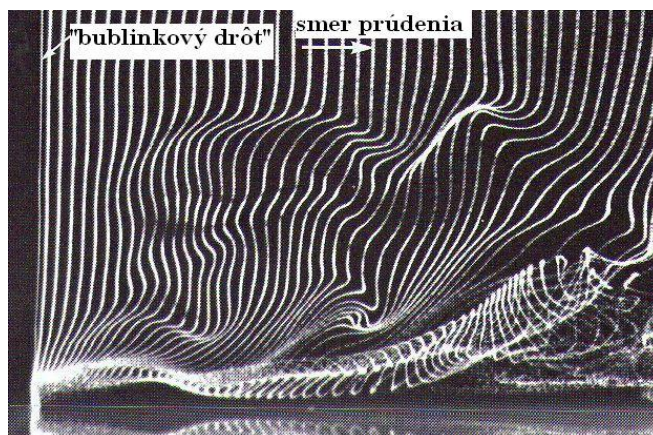
Obr. 8.4 Zvyčajné varianty umiestnenia bublínkových sond [11]

Samotná sonda pozostáva z platinového drôtu s priemerom 25 – 50 μm napnutého medzi dvomi podporami (ako vhodný konštrukčný materiál sa osvedčili mosadzné trubky), ku ktorým je pricínovaný. Miesto platinového drôtu môžu byť použité aj iné materiály ako oceľ či wolfram, nedosiahneme však takú kvalitu vizualizácie ako pri platine nehovoriac o vysokej cene wolframového vlákna. Okrem toho platina je ušľachtilý nekorodujúci kov a ľahko sa pájkuje. Aby sa zabezpečila tvorba vodíkových bublín len na drôte, musia byť ostatné časti sondy elektricky izolované (bužírka, nevodivý náter).

V dôsledku elektrolýzy dochádza k usádzaniu iónov elektrolytu na elektródach, čo vedie k zhoršeniu kvality vizualizácie. Vyčistenie drôtu od usadenín je možné obrátením polarity zdroja na niekoľko sekúnd. Pred zmenou polarity je potrebné znížiť napätie na zdroji pod 50 V.

V súčasnosti je na trhu generátor vodíkových bublín MN-305 od japonskej firmy *Sugawara* pre vizualizáciu prúdenia vo vode s rýchlosťou prúdenia do 1 m/s [19].

Priebeh vizualizácie je dobre viditeľný voľným okom pri bežnom interiérovom osvetlení. Pre tvorbu záznamu sa používa dodatočné fotografické osvetlenie umiestnené po smere prúdenia za sondou. Pre dosiahnutie dobrej kvality snímok je potrebné kontrastné pozadie, najlepšie čiernej farby. Ďalším faktor ovplyvňujúci kvalitu záznamu, je čistota samotného elektrolytu, ktorá sa udržiava pomocou filtra a pridávaním chlóru proti tvorbe rias [11].



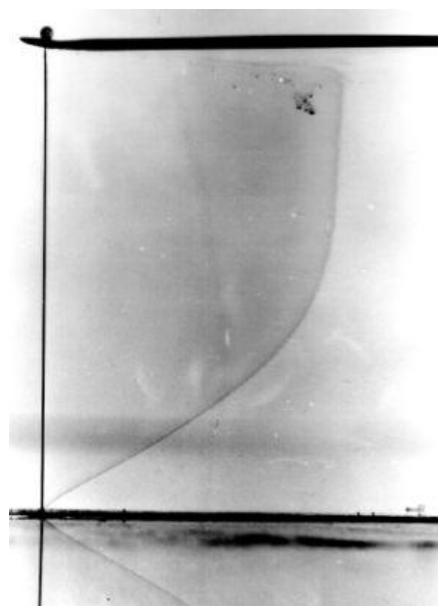
Obr. 8.5 Ukážka vizualizácie turbulentnej medznej vrstvy pomocou zvislých „časových línií“ z vodíkových bublín [11]

8.2 TELÚROVÁ METÓDA

Usporiadanie aparatúry u tejto metódy je podobné ako o vodíkových bublín s tým rozdielom, že použitý drôt je telúrový s priemerom 20 – 100 μm . Táto metóda sa používa hlavne na zviditeľnenie rýchlostných profilov pri laminárnom prúdení s nízkou rýchlosťou (do 1 m/s). Napätie na zdroji sa nastavuje na 10 V. Pôsobením elektrického poľa prebiehajú chemické reakcie medzi telúrom a kyslíkom obsiahnutým vo vode v nasledujúcom pomere:

- 75% $2\text{Te} + 2\text{O} \rightarrow \text{Te}'$
- 25% $\text{Te} + 2\text{O} \rightarrow \text{Te}''$

Anióny telúru sa oddeľujú z povrchu katódy a spolu s kyslíkom vytvárajú koloidný roztok, ktorý je viditeľný ako tmavý oblak [20].

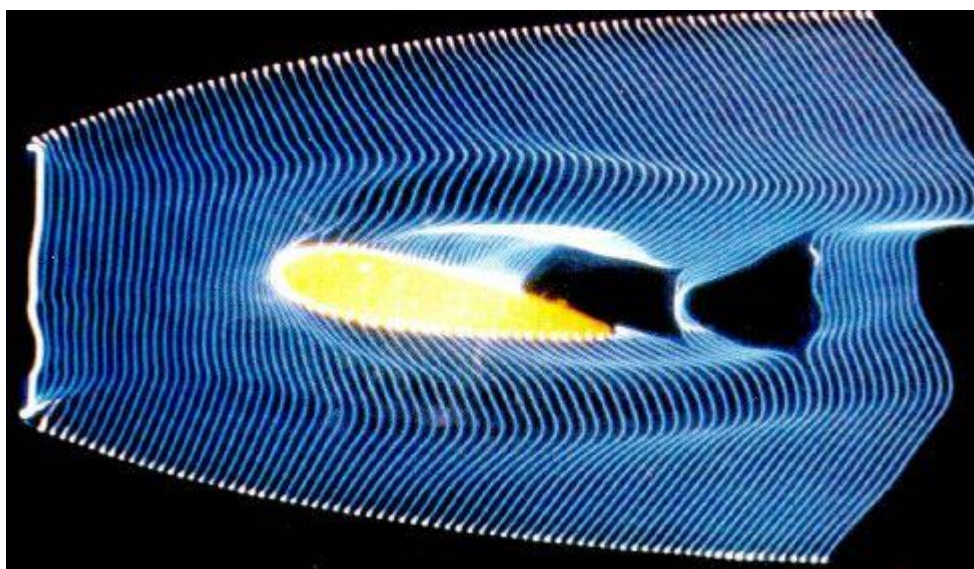


Obr. 8.6 Zviditeľnenie rýchlostného profilu medznej vrstvy pri laminárnom prúdení [4]

Do elektrolytu sa pridáva hydroxid draselný (KOH) pre zvýšenie pH (optimálne na 9 – 10), čo zvyšuje stabilitu tvorby koloidného roztoku. Pre zlepšenie kontrastu sa do elektrolytu môže pridávať peroxid vodíka H_2O_2 , ktorý je ďalším zdrojom kyslíka pre tvorbu koloidného roztoku [22].

8.3 SLEDOVANIE ISKROVÝCH VÝBOJOV

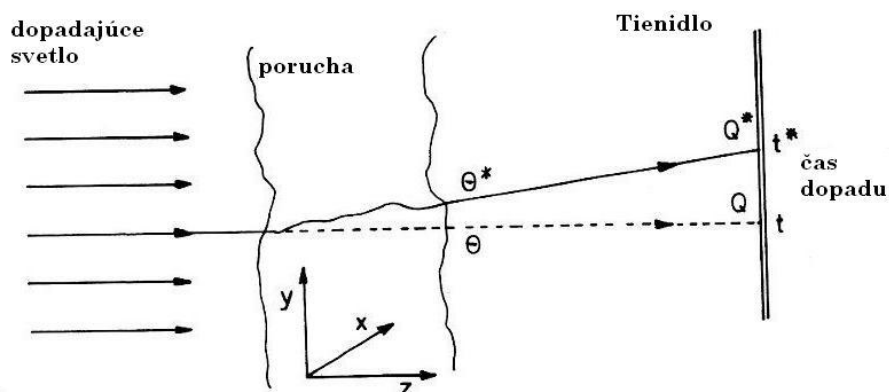
Pomocou tejto metódy (angl. spark tracing) je možné vizualizovať „časové línie“ v prúde vzduchu alebo nehorľavých plynov. Na elektródy tvoriace hornú a dolnú stenu skúšobného potrubia sa periodicky privádzajú krátke impulzy s vysokým napätím asi 60kV s dobou trvania výboja rádovo 10^{-6} s (čas medzi jednotlivými impulzmi musí byť kratší ako čas potrebný na deionizáciu). Výboje sa šíria ako plazmové vlákna unášané prúdom vzduchu. Zo známej frekvencie impulzov a získaného obrazu môžeme získať informácie o rýchlosti prúdenia [1]. Dĺžka iskier môže byť do 50 cm. Statický tlak p_s musí byť vyšší ako 4 kPa pre optimálne šírenie výbojov [20]. Japonská firma *Sugawara* vyrába generátor vysokonapäťových iskrových výbojov MM-305AA pre vizualizáciu prúdenia vzduchu s rýchlosťou od 1 m/s do niekoľkých stoviek m/s [19].



Obr. 8.7 Vizualizácia prúdenia vzduchu okolo profilu krídla iskrovými výbojmi [20]

Optické metódy vychádzajú zo skutočnosti, že zmena hustoty rýchlo prúdiaceho plynu spôsobená jeho stlačiteľnosťou súvisí so súčasťou zmenou indexu lomu tohto plynu. To znamená, že svetelné lúče, ktoré prechádzajú miestom nehomogénneho rozloženia hustoty, sú odchyľované od pôvodnej trajektórie a dochádza aj k ich fázovému posunu [20]. Hoci sa vznik týchto metód datuje do 19. storočia, majú aj dnes vysokú výpovednú hodnotu pri skúmaní prúdenia tekutín. Tieto metódy poskytujú kvalitatívne aj kvantitatívne informácie o priestorových zmenách hustoty, teploty a statického tlaku prúdiacej tekutiny. Za určitých predpokladov poskytujú aj informáciu o rýchlosti prúdenia. Pri týchto metódach nie sú zavádzané žiadne prídavné látky do kvapaliny [11].

Index lomu je vo všeobecnosti funkciou priestorových súradníc $n(x, y, z)$, v prípade nestacionárneho prúdenia je n aj funkciou času.



Obr. 9.1 Odklonenie a spomalenie svetelného lúča na optickej poruche [4]

Pri prechode svetelného lúča optickou poruchou dokážeme merať nasledujúce veličiny:

1. Posunutie na tienidle QQ^*
2. Uhol odklonu lúča po prechode optickou poruchou od lúča, ktorý si zachováva pôvodný smer
3. Fázový posun medzi týmito lúčmi v dôsledku rozdielnej dĺžky ich optických dráh

Merzkirch [4] píše, že optické vizualizačné metódy sú založené na zaznamenávaní jednej z týchto troch veličín alebo ich kombinácií. Existujú tri základné metódy, ktoré v poradí korešpondujú s vymenovanými veličinami:

1. *Tieňová metóda* (angl. shadowgraph method) – citlivosť na druhú

deriváciu indexu lomu $\frac{\partial^2 n}{\partial y^2}$

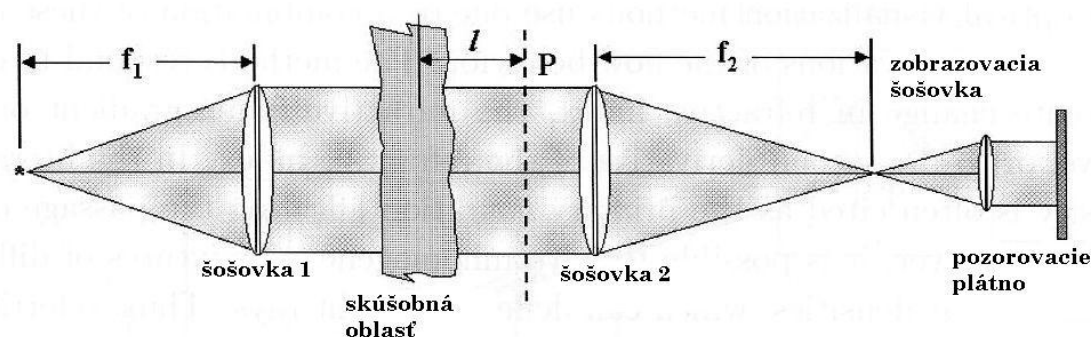
2. *Šlírová metóda* (angl. schlieren method) – citlivosť na prvú deriváciu

indexu lomu $\frac{\partial n}{\partial y}$

3. *Machova – Zehnderova interferenčná metóda* - citlivosť na absolútnu zmenu hustoty $\rho(x, y, z)$

9.1 TIEŇOVÁ METÓDA

Tieňová metóda je najjednoduchšia optická vizualizačná metóda, ktorej vynález sa pripisuje V. Dvořákovi, spolupracovníkovi E. Macha (1880) [4].

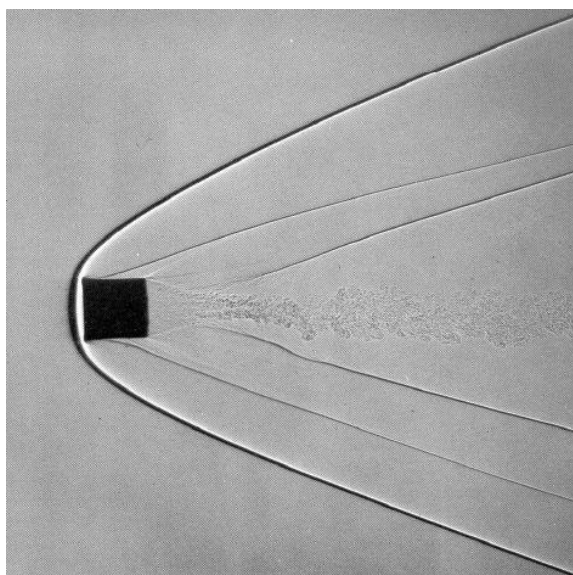


Obr. 9.2 Usporiadanie šošoviek pri tieňovej metóde [11]

Podľa Smitsa [11] musí byť zdroj svetla malý, najlepšie bodový, musí mať však dostatočnú intenzitu, aby obraz nestrácal na ostrosti. V prípade použitia veľkých šošoviek redukuje druhá sférická šošovka veľkosť premietaného obrazu. Lúče prechádzajúce skúšobnou sa ohýbajú vplyvom refrakcie pod určitým uhlom od pôvodného smeru. Pokiaľ nie je druhá derivácia indexu lomu konštantna, budú na tieňografe viditeľné zmeny hustoty (nepravidelné plochy s rôznymi odtieňmi) a každý svetelný lúč sa bude lámať pod iným uhlom. Pokiaľ je gradient indexu lomu konštantna (lineárny priebeh hustoty), je uhol lomu rovnaký pre všetky lúče prechádzajúce danou oblasťou (na tieňograme oblasť s rovnomerným osvitom). Pri konštantnej druhej derivácii sa bude na tieňografe takáto oblasť javiť tiež ako rovnomerne osvetlená a však s nižším jasom. Z toho vyplýva, že tieňová metóda je užitočná

len na zviditeľnenie oblastí, ktorá majú nekonštantnú druhú deriváciu indexu lomu.

Settles [23] píše, že väčšina nevýhod tejto metódy pramení v nejednoznačnosti interpretácie jej výstupu, keďže tieňogram nie je vlastne obraz, ale len tieň. Tieňogramy vo všeobecnosti nekorešponujú so sledovaným objektom v mierke 1 : 1. Len tmavé oblasti tieňogramu predstavujú neskreslenú reprezentáciu sledovaného objektu. Pokiaľ je vzdialenosť tienidla a sledovaného objektu veľká, môžu sa svetelné lúče prekryť alebo prekrížiť ešte predtým, ako sa vytvorí výsledný tieňogram. Vo všeobecnosti je tieňová metóda nevhodná na kvantitatívne posúdenie indexu lomu, keďže je potrebná dvojité integrácia.



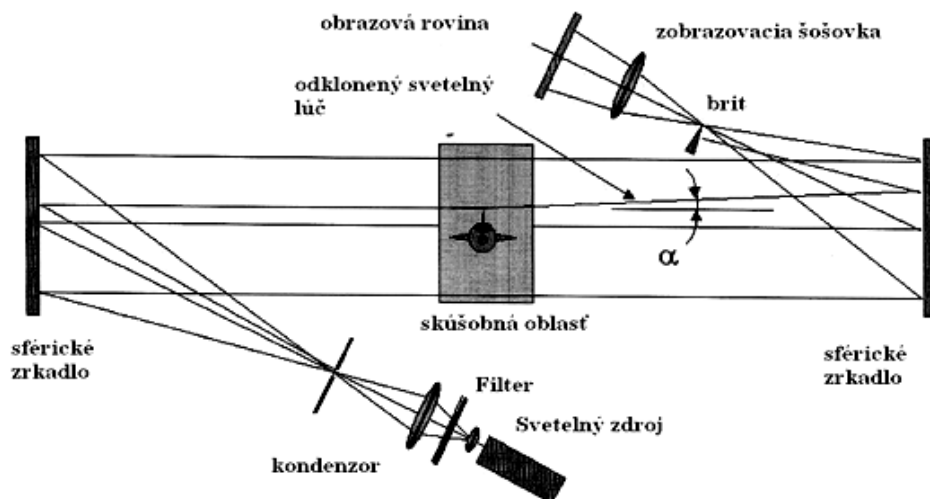
Obr. 9.3 Obtekanie skúšobného telesa pri $Ma = 2,5$ [32]

Využitie nachádza tieňová metóda pri skúmaní nadzvukového prúdenia vďaka svojej jednoduchosti a názornej vizualizácii úkazov ako sú rázové vlny a medzné vrstvy v stlačiteľnom prúdení. Na obr. 9.3 je viditeľná rázová vlna ako tmavý pás, pretože svetelné lúče sa na tejto vlne lámu, spájajú sa a vytvárajú kaustiku. Nábežná hrana tohto útvaru reprezentuje presnú pozíciu rázovej vlny [11].

9.2 ŠLÍROVÁ METÓDA

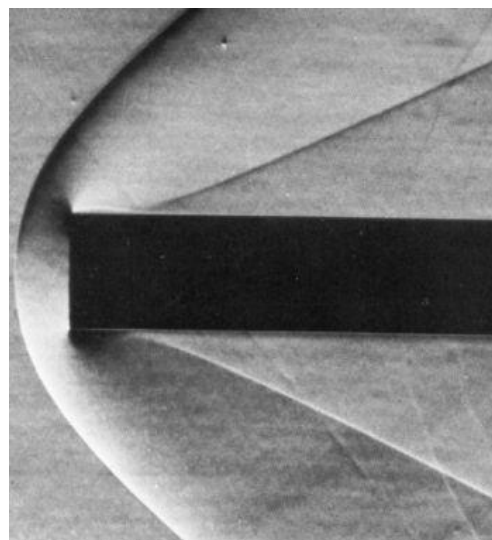
Názov tejto metódy je odvodený z nemeckého slova *Schliere*, ktoré označuje lokálnu nehomogenitu v transparentnej látke (napr. v skle), ktorá spôsobuje nepravidelný lom svetla. Tento výraz sa používa pri určitých optických zariadeniach, ktoré umožňujú kvalitatívnu vizualizáciu týchto nehomogenít a taktiež kvantitatívne posúdenie odklonenia svetelných lúčov. Princíp tejto metódy bol vyvinutý Foucaultom (1859) a Töplerom (1864) [4]. V českej literatúre sa táto metóda označuje aj ako clonková [1].

Hlavným rozdielom oproti aparátúre pre tieňovú metódu je použitie tzv. šlírovej clony (nem. Schlierenblende) s britom. Šlírová metóda pracuje na princípe zakrivovania trajektórie svetelných lúčov prechádzajúcich optickou nehomogenitou, následne sa filtrujú lúče šíriace sa vybraným smerom pomocou clony. Ako zdroj bodového svetla sa často používa ortuťová výbojka alebo laser.



Obr. 9.4 Schéma usporiadania šlírového systému so sférickými zrkadlami [11]

Kolimované svetlo prechádza skúšobnou oblasťou a druhé zrkadlo alebo šošovka sústreďuje svetelné lúče pre vytvorenie obrazu. Brit je umiestnený v ohniskovej rovine druhého zrkadla. Clona je presne nastavená tak, aby odrážala časť svetelných lúčov. Pokiaľ nie sú v skúšobnej oblasti žiadne nehomogenity, rovnomerne sa zníži intenzita emitovaného svetla vplyvom odklonu časti lúčov na clone. Pri prechodne nehomogenitou sa lúče odchyľia o uhol α , čo sa prejaví ich posunom v ohniskovej rovine. Narozdiel od tieňovej metódy je šlírová metóda citlivá na zmenu prvej derivácie indexu lomu podľa súradnice. Rozloženie jasne na obraze odpovedá zmene hustoty v smere kolmom k britu šlírovej clony. V miestach, kde sú prvé derivácie hustoty a teda aj indexu lomu v určitom rozmedzí, vznikajú súvislé oblasti alebo pružky [23].

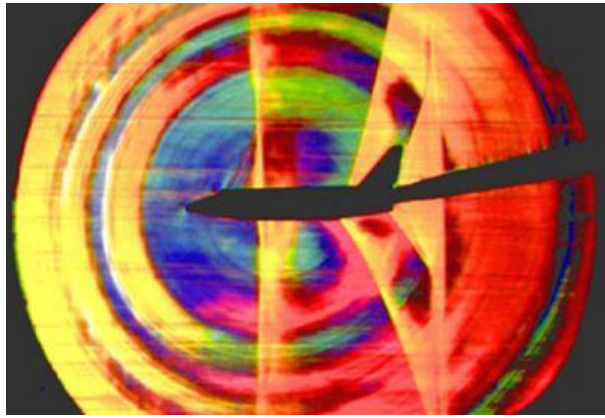


Obr. 9.5 Šlírogram obtekaného valca [32]

Merzkirch [4] popisuje rôzne modifikácie pôvodnej Töplerovej šlírovej metódy, ktoré spočívajú v zmene usporiadania šošoviek či zrkadiel a v úprave geometrie clony.

Významnou modifikáciou pôvodnej šlírovej metódy je farebná šlírová metóda. Jednou z možností pre získanie farebného obrazu je náhrada clony farebným filtrom, ktorý pozostáva z viacerých farebných rovnobežných pružkov (červená, zelená, modrá) vyrobených z komerčne dostupných želatínových materiálov alebo optického skla. Táto metóda funguje len v prípade zdroja bieleho alebo širokopásmového svetla [11].

Šlírová metóda sa s výhodou používa pri výskume prenosových javov (prenos tepla, prenos látky, prenos hybnosti), kde nás zaujíma prvá derivácia indexu lomu alebo inej stavovej veličiny podľa súradnice [1]. Táto metóda je obľúbená hlavne kvôli jednoduchosti optickej aparatúry a vysokému rozlíšeniu obrazu, čo je zásadná výhoda v porovnaní s tieňovou metódou.



Obr. 9.6 Aplikácia farebnej šlírovej metódy na model raketoplánu obtekaného vzduchom nadzvukovou rýchlosťou [20]

9.3 MACHOVA – ZEHNDEROVA INTERFEROMETRIA

Interferometrické metódy umožňujú určiť fázový posun medzi dvomi alebo viacerými svetelnými lúčmi, z ktorých aspoň jeden prešiel skúmaným nehomogénnym transparentným objektom. Lúč, ktorý prechádza týmto objektom sa v literatúre označuje ako *objektový* (angl. object beam), pričom druhý lúč je vedený priestorom so známym indexom lomu a je označovaný ako *referenčný*. Pokiaľ sú splnené podmienky interferencie, vznikajú kombináciou týchto lúčov interferenčné obrazce – interferogramy. Výsledné interferenčné pružky odpovedajú miestam s konštantným indexom lomu, pre prúdenie plynov korešpondujú s miestami s konštantnou hustotou [24].

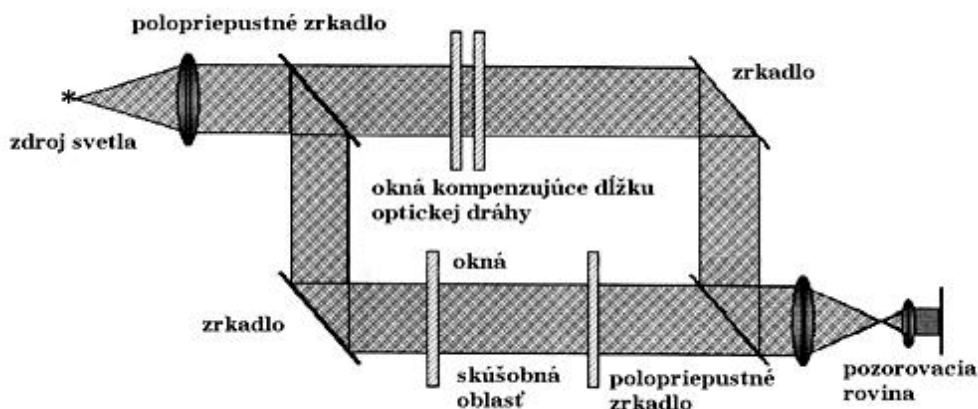


Obr. 9.7 Interferogram obtekania lopatkovej mreže turbíny pri výstupnej rýchlosti vzduchu 445 m/s [20]

Dvomi najrozšírejšími zariadeniami na skúmanie interferencie sú *Machov-Zehnderov interferometer* (MZI) a *holografický interferometer* (HI). Principiálne vzniká interferencia v oboch zariadeniach rovnakým spôsobom, holografická interferencia má výhodu v možnosti získať viac ako len jeden pohľad na prúdenie, pretože umožňuje použitie takmer ľubovoľných skúšobných úsekov. O HI je možné nájsť informácie v citovanej literatúre [4].

Pri porovnaní s predchádzajúcimi dvomi optickými metódami je interferometria pomocou Machovho – Zehnderovho interferometria (ďalej len MZI) vhodnejšia pre kvantitatívne určenie priestorového rozloženia hustoty, pretože zo získaných interferogramov môžeme vyhodnotiť absolútnu hodnotu

indexu lomu [20]. Citlivosť interferometrickej metódy je podmienená použitím koherentného žiarenia, čo zvyšuje nároky na mechanickú presnosť zariadenia a vyžaduje prostredie bez vibrácií, prachu, pôsobenia chemických látok a s nízkou relatívnou vlhkosťou [1].



9.8 Základná konštrukcia Machovho-Zehnderovho interferometra [11]

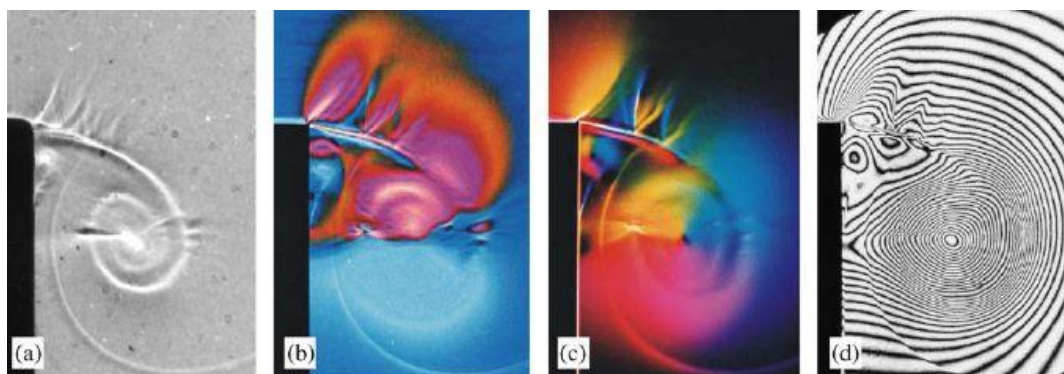
MZI bol vyvinutý nezávisle Zehnderom a L. Machom, synom E. Macha, v rokoch 1891 – 1892. Základnými komponentmi MZI sú koherentný zdroj svetla (napr. laser), deliče zväzkov (polopriepustné zrkadlá), zrkadlá a zobrazovací systém pre sledovanie skúšobnej oblasti a interferenčných prúžkov. Systém je usporiadaný tak, že optické dráhy oboch vetiev systému sú, pokiaľ možno, aspoň približne zhodné. U zrkadiel je dôležitá rovinnosť pre získanie spoľahlivých interferogramov. Zrkadlá sú prestavitelné, čím je umožnená presná regulácia smeru svetelných lúčov. Kompenzačné okná u referenčného zväzku lúčov sa používajú preto, aby sme zohľadnili relatívne dlhú optickú dráhu zväzku prechádzajúceho cez hrubé sklá skúšobnej sekcie. Šošovky použité v pozorovacom systéme slúžia na zaostrenie na žiadanú rovinu v skúšobnej oblasti [11].

V priebehu 20. storočia doznala konštrukcia interferometrov rôznych vylepšení a modifikácií pre zvýšenie citlivosti (*Michelsonov interferometer*, *Jaminov interferometer*, *Fabryov-Pérotov interferometer*). O konštrukcii týchto prístrojov je možné nájsť podrobné informácie v citovanej literatúre [1] a [4].

Interferometrické metódy sa s výhodou používajú pre meranie rozloženia hustôt, teplôt, rýchlostí či koncentrácií, taktiež nachádzajú uplatnenie pri výskume prenosových javov ako prenos tepla, prenos látky či prenos hybnosti [1].

Pre detailné skúmanie určitých javov v prúdiacej tekutine je niekedy potrebné aplikovať viac vizualizačných metód súčasne, keďže každá metóda má určité výhody aj nevýhody a mohlo by dôjsť k nesprávnej interpretácii výsledkov pri použití len jednej metódy. Kline et al. [24] podrobne popisuje možnosti kombinácií optických vizualizačných metód. Napríklad MZI je možné

modifikovať tak, aby boli okrem interferogramov zaznamenávané aj farebné šlírogramy.



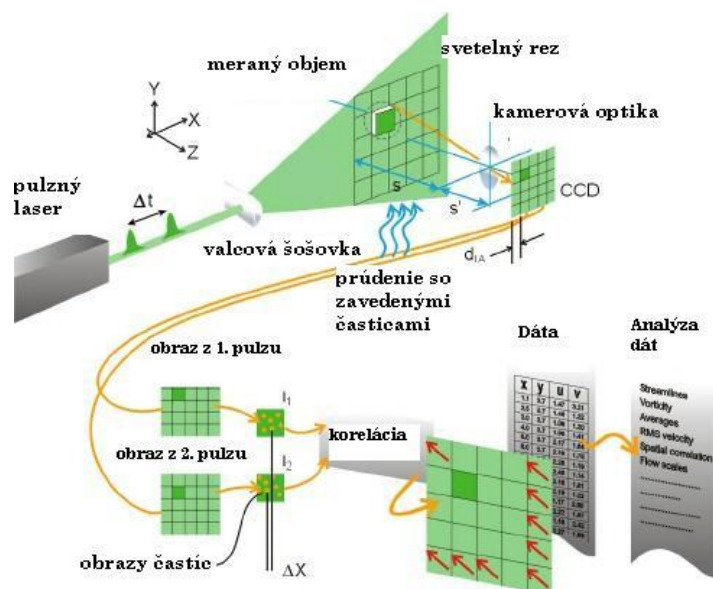
Obr. 9.9 Vír vytvorený tlakovou vlnou, a) tieňogram, b) šlírogram indikujúci veľkosť, c) šlírogram indikujúci smer, d) holografický interferogram [24]

Particle Image Velocimetry (PIV) je moderná metóda vizualizácie prúdenia kvapalín a plynov, ktorá umožňuje meranie vektorov okamžitých rýchlostí a ďalších súvisiacich vlastností tekutín v zvolenom reze prúdového poľa. PIV predstavuje podstatné rozšírenie pôvodných vizualizačných metód zavádzania častíc do kvapaliny o počítačové spracovanie obrazu. Pri jednoduchom usporiadaní sa merajú dve zložky rýchlosti v rovine, použitie stereoskopickej aparatúry umožňuje záznam všetkých troch zložiek rýchlostí v priestore.

Výsledkom aplikácie PIV sú jednak obrazy vizualizácie pohybu častíc, ale predovšetkým môžeme získať vektorovú mapu rýchlostí v reálnom čase. Špecializovaný softvér ďalej umožňuje rôzne úpravy výsledných dát pre prezentáciu [1]. Vektory rýchlosti pri PIV získame meraním posunu obrazov častíc medzi dvomi svetelnými pulzmi vo zvolenej skúmanej oblasti. Digitálna kamera zachytí každý svetelný pulz na samostatnú snímku. Po zaznamenaní sekvencie dvoch za sebou nasledujúcich snímok sa obraz v počítači rozdelí na elementy, tzv. vyšetrovacie oblasti (angl. interrogation areas). Zo známeho časového intervalu medzi snímkami a z posunutia častíc v osách x a y počítač vyhodnotí zložky rýchlosti v danom mieste. Vektorovú mapu získame opakovaním vzájomnej korelácie pre všetky elementy dvoch za sebou nasledujúcich snímok [25].

Zvyčajná skúšobná trať pre PIV pozostáva z týchto komponentov:

- digitálna CCD kamera
- výkonný pulzný laser (Nd:YAG)
- optická sústava (zvyčajne valcová a sférická šošovka), ktorá upravuje laserový lúč do tvaru svetelného noža
- synchronizátor činnosti kamery a laseru
- počítačové vybavenie
- častice zavádzané do prúdenia
- sledované prúdenie tekutiny



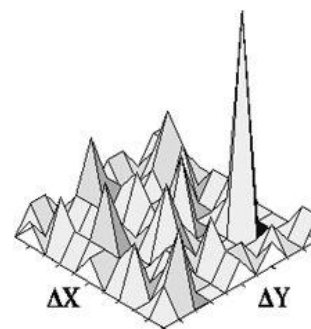
Obr. 10.1 Schéma metódy PIV [25]

Stamhuis [26] píše, že PIV sa môže aplikovať na každú transparentnú tekutinu. Pre presné kopírovanie prúdenia časticami je potrebné, aby boli neutrálne vznášavé a dostatočne malé vzhľadom na sledovaný jav. Okrem látok spomenutých v kap. 5.3 sa do kvapalín zavádzajú častice vyrobené z rôznych polymérnych materiálov (PVC, pliolit) alebo miniatúrne duté sklenené guľičky s reflexnou povrchovou vrstvou. Vhodnými časticami zavádzanými do plynov sú héliové bubliny (kap. 5.4) alebo aerosól (kap. 5.2).

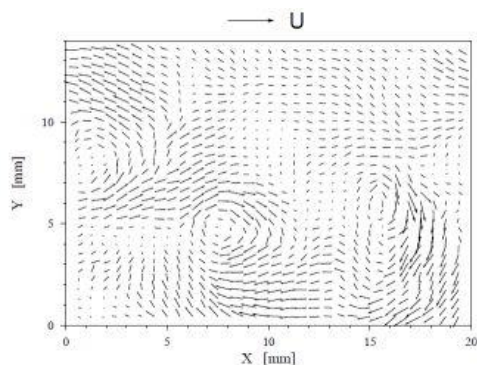
Na osvetlenie skúšobnej oblasti sa takmer výhradne používa laser. Pre PIV sú vhodné dva typy laserov: lasery s kontinuálne emitovaným lúčom (angl. continuous weight, CW) a pulzné lasery. Nevýhodou CW laserov (napr. He-Ne, Ar) je pomerne nízky výkon. Pulzné lasery (napr. Nd:YAG) dokážu vytvoriť podstatne vyššiu intenzitu osvetlenia s vysokou frekvenciou pulzácie, preto sa preferujú pri aplikáciách s vysokou rýchlosťou prúdenia. Ich nevýhodou je vysoká cena a potreba časovej synchronizácie s kamerou.

Osvetlená rovina sa sníma kamerou, ktorej optická os smeruje kolmo na túto rovinu. V súčasnosti sa používajú digitálne kamery s CCD alebo CMOS snímacím čipom, ktoré umožňujú okamžitú analýzu. Výber kamery je podmienený rýchlosťou sledovaného deja a intenzitou osvetlenia. Vysokorýchlostné kamery, ktoré dokážu zaznamenať až 1000 snímok za sekundu, sú vhodné pre rýchle deje s nízkou opakovateľnosťou.

PIV analýza párov snímok spočíva vo výbere elementov obrazu, korelačnej analýze, hľadani „píkov posunutia“ (angl. displacement peaks), výpočte vektoru rýchlosti a opätovnom opakovaní tejto procedúry pre všetky elementy obrazu. Predpokladom pre kvalitnú analýzu je nízke množstvo častíc v jednotlivých elementoch. Na korelačnú analýzu sa využívajú dve metódy: *Fouriérová analýza* a *konvolučná filtrácia*. Detailný popis týchto metód je možné nájsť v citovanej literatúre [27].



Obr. 10.2 Korelačná analýza u PIV [27]

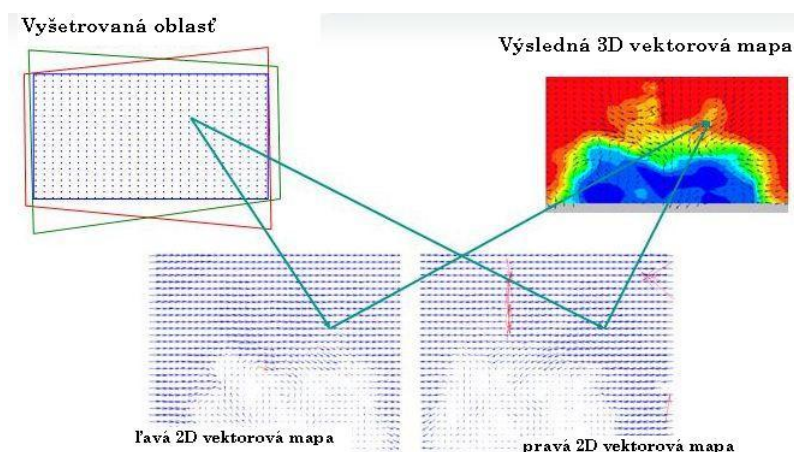


Obr. 10.3 Výsledná vektorová mapa 2D PIV analýzy [27]

Výsledný posuv častíc v elemente obrazu určuje pík s najvyššou intenzitou. Informácia o posunutí v pixeloch z korelačnej analýzy sa premení do metrických jednotiek. Veľkosti rýchlostí získame vydelením posunutí časovou zmenou medzi korelovanými snímkami.

Nasledujúci post-processing zahŕňa validáciu získaných dát a analýzu a vizualizáciu gradientov rýchlostí [26].

Stereoskopická metóda PIV je založená na rovnakom princípe ako ľudský zrak. V úlohe „očí“ sú snímacie kamery, ktorých optické osi v ideálnom prípade zvierajú uhol 90°. Pri meraní získame tri posunutia (δX , δY , δZ) z páru dvojrozmerných posunutí (δx , δy) zachytených ľavou a pravou kamerou. Vlastné stereoskopické meranie začína konvenčnou analýzou 2D-PIV z ľavej a pravej kamery. Na základe parametrov z počiatočnej kalibrácie kamier a pomocou numerických výpočtových metód softvér vytvorí priestorovú vektorovú mapu [25].



Obr. 10.4 Stereoskopická rekonštrukcia obrazu pomocou softvéru firmy Dantec Dynamics [25]

11 PREHLAD PRE VOEBU VIZUALIZAČNÝCH METÓD PRE RÔZNE APLIKÁCIE

	Vizualizácia prúdenia kvapaliny pomocou farbiva	Zviditeľňovanie pomocou dymu a hmly	Zavádzanie častíc do tekutiny
Prúdiace médium	voda a iné kvapaliny	vzduch	Voda a iné kvapaliny, vzduch
Zviditeľňované charakteristiky	prúdnicie, trajektórie častíc, streaklines, povrchové prúdnicie	prúdnicie, streaklines, trajektórie častíc; povrchové prúdnicie	trajektórie častíc, streaklines, prúdnicie
Vhodné prúdenie	laminárne s nízkou rýchlosťou	laminárne až do nadzvukových rýchlostí ⁷	laminárne; stacionárne aj nestacionárne
Praktická aplikácia	<ul style="list-style-type: none"> • obtekanie profilov v hydrodynamickom tuneli • zviditeľňovanie prúdenia v blízkosti povrchu telesa • experimentálne posudzovanie charakteru prúdenia • zviditeľňovanie vírov v kvapaline 	<ul style="list-style-type: none"> • zviditeľňovanie prúdenia v medznej vrstve • zviditeľňovanie prechodu laminárneho prúdenia na turbulentné • obtekanie laminárnych profilov a automobilov • zviditeľňovanie prúdenia zo vzduchotechnických výustok 	<ul style="list-style-type: none"> • obtekanie telies v hydrodynamickom tuneli • vizualizácia 2D prúdenia v zvolenom reze skúšobnej trate • vizualizácia prúdenia na voľnej hladine (tvorba vírov za obtekaným objektom) • Analýza rýchlostí a trajektórií častíc • využitie pre vizualizáciu metódou PIV
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> • nízke náklady • najjednoduchšia metóda • malé množstvo potrebného farbiva 	<ul style="list-style-type: none"> • malé ovplyvnenie prúdenia zavádzanou látkou • <i>generátor dymu</i> – nízke náklady na prevádzku, veľké množstvo generovaného dymu • <i>generátor aerosólu</i> – presne definované rozmery častíc 	<ul style="list-style-type: none"> • nízke náklady • názornosť
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> • nevhodnosť pre turbulentné prúdenie 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>generátor dymu pre zábavný priemysel</i> – nepresná regulácia množstva dymu • <i>generátor aerosólu</i> – vysoká cena 	<ul style="list-style-type: none"> • ovplyvnenie prúdenia zavádzanými časticami (vplyv konečných rozmerov častíc a nerovnosti hustoty kvapaliny a častíc) • nevhodnosť pre turbulentné prúdenie

⁷ Batill, S.M., Nelson, R.C., Mueller, T.J. *High speed smoke flow visualization*. (1982) pp. ed., Washington, U.S.A., Hemisphere Publishing Corp., 1982, p.439-443. Citované podľa [10].

	Vizualizácia prúdenia pomocou héliových bublín	Zviditeľňovanie prúdenia sledovaním upravených povrchov	Vizualizácia pomocou niťových sond
Prúdiace médium	vzduch	voda a iné kvapaliny, vzduch	voda, vzduch
Zviditeľňované charakteristiky	prúdnice, trajektórie častíc, streaklines	povrchové prúdnice, miesta nulovej rýchlosti	rýchlostné pole v určitom reze, smer prúdenia
Vhodné prúdenie	laminárne aj turbulentné až do nadzvukových rýchlostí	laminárne aj turbulentné	laminárne aj turbulentné (min. rýchlosť 2 m/s, optimálna rýchlosť 30 m/s)
Praktická aplikácia	<ul style="list-style-type: none"> vizualizácia prúdenia vo vzduchotechnike obtekanie telies kvantitatívna vizualizácia prúdenia v medznej vrstve využitie pre priestorovú vizualizáciu metódou PIV 	<ul style="list-style-type: none"> experimentálna aerodynamika letúnov (prechod medzi trupom a krídlom) zviditeľňovanie prúdenia v blízkosti povrchu (prechod laminárneho prúdenia na turbulentné, bod nulovej rýchlosti) 	<ul style="list-style-type: none"> analýza rýchlostného pola v smere kolmom na smer prúdenia za telesom obtekaným vo veternom tuneli zistenie smeru prúdenie v tesnej blízkosti povrchu telesa
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> nízke náklady na prevádzku široké možnosti použitia vo všetkých odvetviach inžinierskej činnosti, kde sa rieši prúdenie vzduchu neutrálna vznášavosť bublín 	<ul style="list-style-type: none"> pomerne jednoduchá aplikácia 	<ul style="list-style-type: none"> pomerne jednoduchá aplikácia
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> niekedy problematické nastavenie generátora na požadované hodnoty veľkosti a množstva generovaných bublín 	<ul style="list-style-type: none"> ovplyvnenie prúdenia aplikovanou látkou len kvalitatívna vizualizácia 	<ul style="list-style-type: none"> obmedzené možnosti použitia ovplyvnenie prúdenia niťovými sondami v závislosti na rozmeroch vlákna

	Vizualizácia prúdenia vody pomocou vodíkových bublín	Telúrová metóda	Sledovanie iskrových výbojov
Prúdiace médium	voda	voda	vzduch, nehorľavé plyny
Zviditeľňované charakteristiky	prúdnice, timelines	rýchlostný profil medznej vrstvy	absolútna zmena indexu lomu
Vhodné prúdenie	laminárne s nízkou rýchlosťou (do 1 m/s)	laminárne s nízkou rýchlosťou (do 1 m/s)	laminárne s rýchlosťou od 1 m/s do niekoľko stoviek m/s
Praktická aplikácia	<ul style="list-style-type: none"> vizualizácia prúdenia v blízkosti povrchu obtekaného telesa sledovanie zmeny rýchlosti kolmo k povrchu 	<ul style="list-style-type: none"> zviditeľnenie rýchlostného profilu laminárnej medznej vrstvy obtekaného rovinného povrchu 	<ul style="list-style-type: none"> vizualizácia prúdenia vzduchu okolo laminárnych profilov či rôznych iných objektov
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> jednoduchá aparatóra kvalitatívna aj kvantitatívna vizualizácia 	<ul style="list-style-type: none"> jednoduchá aparatóra kvalitatívna aj kvantitatívna vizualizácia 	<ul style="list-style-type: none"> Možnosť presnej regulácie pre široký rozsah rýchlosti prúdenia
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> nevhodnosť pre turbulentné prúdenie 	<ul style="list-style-type: none"> vhodnosť len pre nízke rýchlosti 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké elektrické napätie

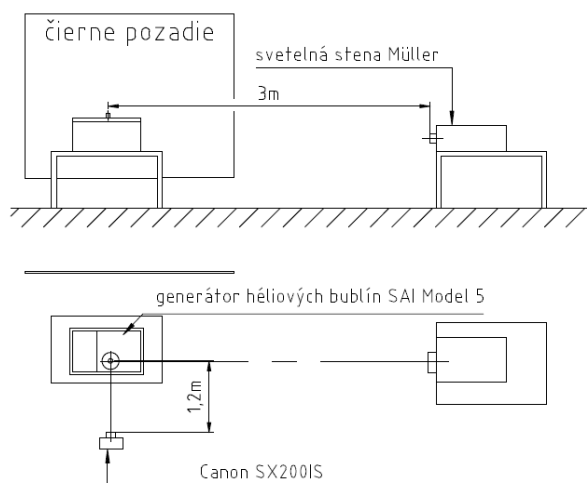
	Tieňová metóda	Šlírová metóda	Machova - Zehnderova interferometria
Prúdiace médium	vzduch	vzduch	vzduch
Citlivosť	druhá derivácia indexu lomu	prvá derivácia indexu lomu	Absolútna zmena indexu lomu (hustoty)
Vhodná rýchlosť prúdenia	nadzvukové prúdenie	od prirodzenej konvekcie po nadzvukové prúdenie	od prirodzenej konvekcie po nadzvukové prúdenie
Praktická aplikácia	<ul style="list-style-type: none"> vizualizácia rázových vln a medznej vrstvy v stlačiteľnom prúdení 	<ul style="list-style-type: none"> vizualizácia prenosových javov (prenos tepla, látky, hybnosti) 	<ul style="list-style-type: none"> kvantitatívne určenie priestorového rozloženia hustoty vizualizácia prenosových javov (prenos tepla, látky, hybnosti)
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> jednoduchosť a názornosť vizualizácie 	<ul style="list-style-type: none"> jednoduchá aparatóra vysoké rozlíšenie obrazu 	<ul style="list-style-type: none"> kvalita vizualizácie
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> nejednoznačnosť interpretácie skreslený obraz nevhodnosť na kvantitatívne posúdenie indexu lomu nízke rozlíšenie obrazu 	<ul style="list-style-type: none"> veľká citlivosť na externé vplyvy (vibrácie) 	<ul style="list-style-type: none"> nároky na mechanickú presnosť citlivosť na vibrácie, prach, pôsobenie chemických látok a vysokej relatívnej vlhkosti vzduchu

Particle Image Velocimetry	
Prúdiace médium	Akákoľvek transparentná tekutina, do ktorej je možné zavádzať sledované častice
Zviditeľňované charakteristiky	Vektorová mapa rýchlostného poľa (2D alebo 3D)
Vhodná rýchlosť prúdenia	Od nulovej rýchlosti po nadzvukové prúdenie
Praktická aplikácia	<ul style="list-style-type: none"> • široké možnosti uplatnenia vo všetkých oblastiach výskumu prúdenia (biológia, chémia, technika prostredia, aerodynamika, hydrodynamika atď.)
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> • presné vyhodnotenie v reálnom čase • možnosť post processingu získaných údajov
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> • Nejednoznačná interpretácia výsledkov u 2D PIV pri sledovaní priestorového prúdenia • Vysoká cena vybavenia

12 EXPERIMENT

Pre jednoduchý vizualizačný pokus bola zvolená metóda héliových bublín. Cieľom pokusu bolo zviditeľniť a fotograficky zaznamenať prúdenie zmesi plynov z výstupnej trysky cyklónovej komory generátora bublín.

12.1 USPORIADANIE APARATÚRY



Obr. 12.1 Schéma usporiadania aparatury

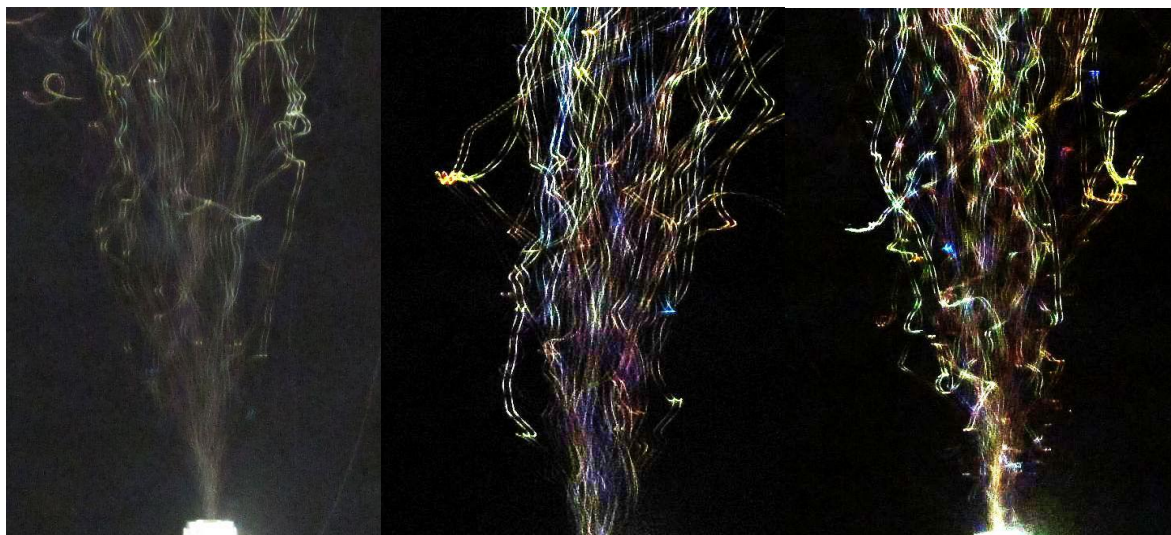
Skúšobná aparatúra bola usporiadaná tak ako znázorňuje Obr. 12.1. Svetelná stena bola umiestnená do určitej vzdialenosti a zaostrená tak, aby divergentný svetelný pás vhodne osvetlil trysku generátora. Do generátora bublín boli pripojené prívodné hadice hélia a stlačeného vzduchu. Podľa návodu bol generátor uvedený do činnosti otvorením prívodu roztoku a hélia do generačnej hlavice po malých krokoch a potom sa postupne pridával stlačený vzduch. Snahou bolo dosiahnuť správne pomery pre čo najväčšie množstvo generovaných bublín.



Obr. 12.2 Skúška generátora bublín bez krytu cyklónovej komory

12.2 TVORBA ZÁZNAMU

Pri experimente som pracoval s fotoaparátom Canon SX200IS s manuálnym zaostrovaním a rozlíšením 12 Mpx, ktorý bol umiestnený v statíve a jeho optická os bola nasmerovaná kolmo k čiernemu plátnu a svetelnej stene. Svetelná stena bola nastavená na šírku približne 4 cm. Pre potreby fotografovania sa minimalizovalo množstvo slnečného svetla v miestnosti zatiahnutím žalúzií. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri ohniskovej vzdialenosti 1 – 1,2 m, clonovom čísle F 4.5, čase uzávierky 1s a hodnote citlivosti ISO 800 a 1600. Snímky zachytené pri týchto vysokých hodnotách citlivosti však už obsahovali veľké množstvo šumu a bola potrebná dodatočná korekcia farieb a kontrastu.



Obr. 12.3 a) ISO 1600 bez úpravy, b) ISO 800 po úprave kontrastu a farebnosti, c) ISO 1600 po úprave kontrastu a farebnosti

12.3 ZHODNOTENIE

Počas realizácie experimentu sa ukázalo, že originálny roztok na tvorbu bublín dodávaný výrobcom generátora pravdepodobne vplyvom uplynutej životnosti alebo nedodržaním skladovacích podmienok u dodávateľa nedokázal splniť svoj účel. Ako náhrada bol použitý roztok zo zmesi originálneho roztoku, saponátu a glycerínu. Množstvo generovaných bublín zďaleka nedosahovalo hodnoty deklarované výrobcom. Pri tvorbe záznamu sa nám podarilo len minimálne obmedziť množstvo slnečného svetla v laboratóriu. Pre lepšie výsledky by bolo vhodné vykonať vizualizačný experiment v temnej miestnosti bez okien alebo s možnosťou dokonalejšieho zatemnenia. Na fotografickom zázname sú však jasne viditeľné trajektórie jednotlivých bublín prejdených za expozičnú dobu. Analýzou záznamu by bolo možné získať rýchlosť prúdenia.

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť stručný prehľad metód vizualizácie prúdenia. Úvodná kapitola má poskytnúť pohľad na niektoré historicky významné experimenty z oblasti mechaniky tekutín, pri ktorých významnú úlohu zohrala vizualizácia prúdenia. Následne som uviedol stručnú charakteristiku kriviek a kritických bodov, ktoré je možné zviditeľniť v prúdovom poli. Pri štúdiu tejto problematiky som zistil, že niektoré odborné termíny v anglosaskej a nemeckej literatúre nemajú zatiaľ zavedený ekvivalent v českom či slovenskom jazyku, preto som tieto termíny použil nepreložené, prípadne som použil moju vlastnú interpretáciu týchto pojmov uvedenú v úvodzovkách. Niektoré, aj napriek tomu, že majú tuzemský ekvivalent, uvádzam v zátvorke v anglickom jazyku, ak by čitateľ chcel vyhľadať viac informácií k danej problematike.

Vizualizačné metódy som rozdelil do dvoch základných skupín na experimentálne a počítačovo asistované. Jednotlivé experimentálne metódy som radil od najjednoduchších metód po zložitejšie metódy na základe fyzikálnych princípov, na ktorých sú jednotlivé metódy založené. U každej metódy som sa snažil poskytnúť základné informácie o potrebnom vybavení, možnostiach aplikácie a špecializovaných výrobkoch v súčasnosti dostupných na trhu pre jednotlivé metódy. Počítačovo asistované metódy získavajú dáta z experimentálneho merania a tie sú následne spracované pomocou výpočtovej techniky. Ako zástupcu týchto metód som zvolil veľmi často používanú metódu PIV.

V záverečnej časti práce bol uvedený popis jednoduchého experimentu realizovaného metódou héliových bublín. Pôvodne plánovaný rozsah experimentu bol zmenšený z dôvodu výskytu komplikácií s generátorom héliových bublín. Pri použití originálneho roztoku dodávaného výrobcom sa nepodarilo uviesť generátor do chodu. Túto skutočnosť je možné pripísať nesprávnemu skladovaniu u dodávateľa prípadne prekročenej dobe trvanlivosti roztoku. Pri opakovanom pokuse bol pôvodný roztok nahradený zmesou originálneho roztoku s pridaným glycerínom a saponátom. S týmto roztokom sa mi podarilo vizualizovať výtok zmesi plynov z trysky cyklónovej komory generátora pomocou héliových bublín a vytvoriť fotografický záznam.

Prínos tejto práce vidím v kompaktnosti poskytnutých informácií o problematike, o ktorej nie sú s výnimkou zdroja [1] k dispozícii žiadne informácie v súčasnej odbornej tuzemskej literatúre. Táto práca môže slúžiť ako príručka pre získanie základného prehľadu o dostupných experimentálnych vizualizačných metódach pre praktické aplikácie. Vyčerpávajúce informácie o jednotlivých metódach čitateľ nájde v citovaných informačných prameňoch.

14 ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

A_{ij}		tenzor gradientu vektoru rýchlosti prúdenia
d_p	(m)	priemer častice
d		matematický operátor diferenciálu
f	(m)	ohnisková vzdialenosť
F	(-)	clonové číslo
g	(m.s ⁻²)	tiažové zrýchlenie
I	(A)	elektrický prúd
n	(-)	index lomu
pH	(-)	záporný dekadický logaritmus koncentrácie vodíkových iónov v roztoku
P, Q, R		invarianty tenzoru gradientu rýchlosti
p_s	(Pa)	statický tlak
s	(m)	dráha
q		skalárne pole veľkostí rýchlostí
t	(s)	čas
U	(V)	elektrické napätie
\vec{v}		vektor okamžitej rýchlosti
v_x, v_y, v_z		zložky vektoru rýchlosti v smeroch súradnicových osí
v_p	(m.s ⁻¹)	veľkosť rýchlosti častice
v_s	(m.s ⁻¹)	veľkosť sedimentačnej rýchlosti častice
\vec{x}_s		polohový vektor bodu prúdnice
\vec{x}_p		polohový vektor častice
∂		matematický operátor parciálnej derivácie
λ		vlastné čísla matice
μ_F	(Pa.s)	dynamická viskozita kvapaliny
τ_p	(s)	krivkový parameter
ρ_p	(kg.m ⁻³)	hustota častíc
ρ_F	(kg.m ⁻³)	hustota tekutiny

15 BIBLIOGRAFIA

- [1] **PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E. a ŠTĚTINA, J.** Vizualizační a optické měřicí metody,. [Online] 2007. [Datum: 20. Január 2010.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/index.htm>.
- [2] eFluids Gallery of Images – Leonardo da Vinci. [Online] [Datum: 9. Február 2010.] http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery_pages/da_vinci_page.htm.
- [3] Multimedien für Physikausbildung. [Online] [Datum: 9. Február 2010.] http://pen.physik.uni-kl.de/medien/MM_Videos/index.html?/medien/MM_Videos/reynolds/farbfaden-web-eng.htm.
- [4] **MERZKIRCH, Wolfgang.** *Flow Visualization*. Druhé vydanie. London : Academic Press, 1987. s. 2-177. ISBN 0-12-491351-2.
- [5] **SCOTT, Jeff.** Ernst Mach and Mach Number. [Online] 2003. [Datum: 10. Február 2010.] <http://www.aerospaceweb.org/question/history/q0149.shtml>.
- [6] **PRANDTL, Ludwig.** *Prandtl's Essentials of Fluid Mechanics*. [ed.] Herbert Oertel. Druhé vydanie. New York : Springer, 2004. s. 47-62. ISBN 0-387-40437-6.
- [7] **SCHUMANN, H. a MÜLLER, W.** *Visualisierung: Grundlagen und allgemeine Methoden*. Berlin : Springer Verlag, 2000. s. 318-339. ISBN 3-540-64944-1.
- [8] Theodore von Kármán. *Encyclopædia Britannica*. [Online] [Datum: 9. Február 2010.] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/312519/Theodore-von-Karman/>.
- [9] *Investigations of Karman Vortex Street Using Flow Visualization and Image Processing*. **PANAKIN, G. L., KULINCZAK, A. a BERLINSKI, J.** 138, 26. August 2007, Sensors and Actuators A: Physical, s. 366-375. ISSN 0924-4247.
- [10] **MUELLER, T.J. a NELSON, R.C.** *Aerospace at the University of Notre Dame*. Notre Dame : University of Notre Dame, 2004.
- [11] **SMITS, A. J. a LIM, T. T.** *Flow Visualization : Techniques and examples*. London : Imperial College Press, 2003. ISBN 1-86094-193-1.
- [12] **KLINE, Stephen J.** *Flow Visualization*. Stanford University, 1963.
- [13] **HANSEN, C. D. a JOHNSON, C. R.** *The Visualization Handbook*. Burlington : Elsevier, 2005. s. 261-330. ISBN 0-12-387582.
- [14] **FABER, T. E.** *Fluid Dynamics for Physicists*. Cambridge : University Press, 1995. s. 27-33. ISBN 0-521-41943-3.
- [15] **NAKAYAMA, Y. a BOUCHER, R. F.** *Introduction to Fluid Mechanics*. Burlington : Elsevier, 2000. s. 274-291. ISBN 978-0-340-67649-3.
- [16] Fluorescein - Wikipedia, the free encyclopedia. [Online] [Datum: 5. Apríl 2010.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescein>.

- [17]Smoke Machines. [Online] [Dátum: 3. Apríl 2010.]
<http://www.smokemachines.net/buy-hand-portable-smoke-generator.shtml>.
- [18]PALAS Aerosol- und Partikeltechnologie. [Online] [Dátum: 4. Apríl 2010.]
http://www.palas.de/PDF_NEU/AGF%20Serie.pdf.
- [19] SUGAWARA Laboratories Inc. Advanced products - STROBOSCOPES.
 [Online] [Dátum: 20. Apríl 2010.] <http://www.sugawara-labs.co.jp/english/strobo5.html>.
- [20]WÜRZ, Werner. Experimentelle Strömungsvisualisierung. [Online]
 [Dátum: 14. Marec 2010.] <http://www.iag.uni-stuttgart.de/laminarwindkanal>.
- [21]SAGE Action, Inc. SAI Model 5 Console. [Online] 8. Marec 2010. [Dátum:
 4. Apríl 2010.] <http://www.sageaction.com/MMD5v1.htm>.
- [22]MERZKIRCH, Wolfgang. *Flow Visualization*. Salt Lake City : Academic Press, 1974. s. 2-177. ISBN 0-12-491351-2.
- [23]SETTLES, G.S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualising Phenomena in Transparent Media*. Berlin : Springer Verlag, 2001. ISBN 3-540-66155-7.
- [24]KLEINE, H., GRÖNIG, H. a TAKAYAMA, K. Simultaneous shadow, schlieren and interferometric visualization of compressible flows. *Optics and Lasers in Engineering*. 2006, 44, s. 170-189.
- [25]Dantec Dynamics. *Particle Image Velocimetry measurement principles*. [Online] [Dátum: 30. Apríl 2010.]
<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=820>.
- [26]STAMHUIS, E.J. Basics and principles of particle image velocimetry (PIV) for mapping biogenic and biologically relevant flows. *Aquatic Ecology*. 2006, 40, s. 463-479.
- [27]WESTERWEEL, Jerry ISBN 90-6275-881-9. *Digital Particle Image Velocimetry: Theory And Application*. Delft : Delft University Press, 1993. ISBN 90-6275-881-9 .
- [28]GRANGER, R. A. *Fluid Mechanics*. Dover : Dover Publications, 1995. s. 422-432. ISBN 0-486-68356-7.
- [29]LIM, T.T. Flow Gallery. [Online] [Dátum: 20. Január 2010.]
<http://serve.me.nus.edu.sg/limtt/>.
- [30]SIDEMAN, S. a HIJIKATA, K., [ed.]. *Imaging in Transport Processes*. New York : Begel House, 1993. ISBN 1-56700-012-6.
- [31]RAFFAEL, M., a iní. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Berlin : Springer Verlag, 2007. ISBN 978-3-540-72307-3 .
- [32]VAN DYKE, M. *An Album of Fluid Motion*. Stanford : The Parabolic Press, 1982. ISBN 0-915760-02-9.
- [33] Department of Aeronautics and Astronautics - Postgraduate Naval School. [Online] [Dátum: 3. Apríl 2010.]
http://aa.nps.edu/programs/labs/low_speed_tunnel/.

[34]**JACOB, Jamey.** UK Fluids Lab Gallery. [Online] 2005. [Dátum: 4. Apríl 2010.] <http://www.engr.uky.edu/~jdjacob/fml/gallery.html>.

[35]**RENIFF, C. W. a Ordway, D.E.** See The Unseen. *SAGE Action, Inc.* [Online] [Dátum: 4. Apríl 2010.]

http://www.sageaction.com/See_The_Unseen.htm.

[36]**HICKS, Clifford B.** The Strange Forces of The Air. 1959, Zv. III, 6, s. 125-129.